



Prof. Dr. MURAT TÜRKES

Boğaziçi Üniversitesi İklim Değişikliği ve Politikaları Uygulama ve Araştırma Merkezi Yönetim Kurulu Üyesi

murat.turkes@boun.edu.tr

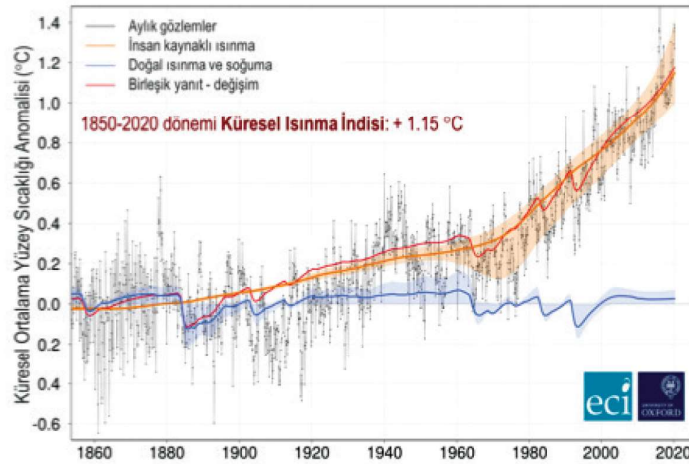
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ NEDİR, İKLİM GERÇEKTEN DEĞİŞİYOR MU, SONUÇLARI NELERDİR?

Bu kısa değerlendirmede, önce temel hava ve iklim kavramları ele alınmış, sonra da Dünya’da ve Türkiye’de gözlenen iklim değişikliği ve değişkenliğine ilişkin hakemli çalışmaların başlıca bulgu ve sonuçlarının alansal ve zamansal bir değerlendirmesi yapılmıştır.

Konuya, bugünlerde Türkiye’de etkili olan gökgürültülü şimşekli fırtınalar, süper hücre fırtınaları-hortumlar, şiddetli sağanak yağışları, seller ve taşkınlar vb. şiddetli hava olayları nedeniyle yeniden karıştırılan dört önemli kavramın kısaca tanımlanmasıyla başlamakta yarar görmekteyiz. Bunlardan birincisi olan **hava**, “herhangi bir yerde ve zamandaki atmosfer koşullarının kısa süreli durumudur”. İklim ise, çok genel olarak “herhangi bir yerdeki ortalama hava koşulları” biçiminde tanımlanabilir (Türkeş, 2008a). Ancak, iklim teriminin, uzun süreli klimatolojik ve meteorolojik gözlemler süresince kaydedilen uç değerleri, onların istatistiksel oluşma olasılıklarını ve tüm değişkenlik özelliklerini de içermesi gerekir. Bu yüzden, günümüzde **iklim**, “belirli bir alandaki hava koşullarının, atmosfer öğelerinin değişkenlikleri ve ortalama değerleri gibi uzun süreli (geleneksel olarak 30 yıl ve daha fazla) istatistikleri ile tanımlanan birleşimi” şeklinde de tanımlanır olmuştur (Türkeş, 2008b). Bu yeni tanımda geçen ‘birleşim’ terimi, ortalama

Hava, “herhangi bir yerde ve zamandaki atmosfer koşullarının kısa süreli durumudur.” İklim ise, çok genel olarak “herhangi bir yerdeki ortalama hava koşulları” biçiminde tanımlanabilir.

teriminden daha fazlasını içerir. İklim değişikliği, “iklimin ortalama durumunda ya da onun değişkenliğinde onlarca ya da daha uzun yıllar boyunca süren istatistiksel olarak anlamlı değişimler” olarak tanımlanabilir. Dördüncü önemli kavram durumundaki **iklimsel değişkenlik** ise, “tüm zaman ve alan ölçeklerinde iklimin ortalama durumunda ve standart sapmalar ile uç olayların gerçekleşme sıklık ve olasılıkları gibi öteki istatistiklerinde ortaya çıkan değişimler” şeklinde tanımlanabilir (Türkeş, 2008a ve 2008b). İklim değişikliği ve iklim değişkenliği (iklimsel değişebilirlik), iklim sistemi içerisindeki doğal iç süreçlere ya da insan (antropojen) ve doğal kaynaklı dış zorlama etmenlerindeki değişimlere bağlı olarak oluşabilir.



Şekil 1:

19. Yüzyılın ikinci yarısına (1850-1900) oranla insan kaynaklı küresel ısınma indisi ve zamansal değişimleri.



Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) 5. Değerlendirme Raporu kapsamında hazırlanan İklim Değişikliğinin Fiziksel Bilim Temeli Raporuna göre, *küresel iklimdeki ısınma kesindir ve 1950'li yıllardan beri iklimde gözlenen değişikliklerin çoğu son bin yıllık döneme kadar daha önce hiç görülmemiş düzeydedir* (IPCC, 2013). Geçen 30 yılın her 10 yılı, yeryüzünde 1850'den beri kaydedilen küresel yüzey sıcaklıklarının tüm on yıllık dönemlerinden daha sıcak olmuştur. Küresel ortalama yüzey sıcaklığı verileri, 1901 – 2010 döneminde, 0.89 °C'lik [0.69 – 1.08 °C güven aralığında] doğrusal bir artış göstermiştir. Bu dönem boyunca hemen tüm Yerküre yüzeyi ve atmosferin yaşamın ve hava olaylarının oluştuğu en alt katmanı olan Troposfer, küresel olarak 20'nci yüzyılın ortalarından beri ısınmıştır. 15 Nisan 2020 tarihine kadar güncellenmiş yüzey sıcaklığı gözlemlerini de içeren hesaplamalara göre, insan kaynaklı küresel ısınma değeri yaklaşık 1.15 °C'ye ulaşmıştır (<http://www.globalwarmingindex.org/>). Ayrıca, dolaylı eski iklim verileri, Kuzey Yarımküre'de 1983 – 2012 döneminin olasılıkla son 1400 yılın en sıcak 30 yıllık dönemi olduğunu gösterir. Bu dönemde, atmosfer ve okyanuslar ısınmış, kar ve buz tutarları azalmış, ortalama deniz düzeyi yükselmiş ve sera gazlarının atmosferdeki birikimleri artmıştır.

Küresel ölçekte 1900 – 2012 döneminde alansal ve zamansal olarak yüksek bir değişkenlik göstermiş ve yağış tutarlarında bölgesel ölçekte kuraklaşma ve artış eğilimleri gözlenmiştir. Kuzey Yarımküre kararlarında yağışlar, 1901'den beri artmıştır. Kuzey ve Güney Amerika'nın doğu bölümleri, Kuzey Avrupa ve Asya'nın orta bölgeleri ile kuzeyinde kaydedilen yağış tutarlarında *önemli artış eğilimleri* gözlenirken, *önemli kuraklaşma* ya da *azalış eğilimleri* ise Sahel, Türkiye'yi de içeren Akdeniz havzası, Güney Asya'nın bir bölümü ile Afrika'nın güneyinde etkili olmuştur (IPCC, 2013; Türkeş, 2013a, 2013b; Türkeş, 2014). Ayrıca, dünyanın birçok bölgesi ve Türkiye'deki *şiddetli yağış olaylarında* (aşırı yüksek ve aşırı düşük yağışlar, vb.) ve *ortalama hava sıcaklıklarında* da *önemli artışlar* gözlenmiştir (IPCC, 2013; Türkeş, 2013a; Türkeş ve Erlat, 2018, vb.). Dünyanın birçok bölgesinde olduğu gibi, Türkiye'de de yağışlardaki değişimler uzun süreli eğilimlerden çok, çeşitli değişim ve dalgalanma biçimleriyle birlikte kurak ve nemli (yağış) dönemlerin sıklıklarında ve büyüklüklerinde belirlenen önemli değişiklikler biçiminde olmaktadır (Trigo ve ark., 2006; Türkeş, 2013b, 2018; Türkeş ve Erlat, 2003,

2005; Türkeş ve Tatlı, 2009; Türkeş ve ark., 2009a, 2009b). Yağış değişimlerinin alansal değişkenliği de kuvvetlidir. Sözü edilen bu kuraklaşma eğiliminden Türkiye'de en fazla, Ege, Akdeniz, Marmara, İç ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri etkilenmiştir.

Son 40 yılda özellikle kış mevsimindeki ve yıllık yağış değişiklikleri dikkate alındığında, Türkiye'deki kuraklık olaylarının en şiddetli ve geniş yayımlı olanları, 1971-1974, 1983-1984, 1989-1990 ve 2007-2008 dönemleri ile 1996 ve 2001 yıllarında oluşmuştur (Türkeş, 2013a; Türkeş ve Erlat, 2003, 2005, 2018; Türkeş ve Tatlı, 2009; Türkeş ve ark., 2009a ve 2009b). Türkiye'nin büyük bölümünde etkili ve şiddetli su açığının ve yetersizliğinin yaşanmasına yol açan 2007-2008 kuraklığının ardından, 2009-2011 döneminde genel olarak uzun süreli ortalamadan ya da normal yağıştan daha nemli/yağışlı koşullar (yağışlı ya da ıslak devre) egemen olmuştur (Türkeş, 2013a, 2014, 2018). Ancak, 2012 yılında karasal İç Anadolu ve Doğu Anadolu'nun bazı bölümlerinde yeniden etkili olmaya başlayan meteorolojik kuraklıklar, yaz kuraklığıyla birleşerek, 2013 yılının Türkiye'nin büyük bölümünde, özellikle karasal İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgeleri ile Orta ve Doğu Akdeniz, Doğu Marmara ve Orta Karadeniz bölümlerinde ortadan olağanüstü kurağa kadar değişen şiddette kurak geçmesine yol açmıştır. Sonuç olarak, 01 Ekim 2013 – 17 Ocak 2014 tarihleri arasında Türkiye geneli için hesaplanan kümülatif yağış tutarında, uzun yıllar ortalamasına göre % 37 ve 2013 yılına göre de % 47.4 oranında azalma gerçekleşti (Türkeş ve Yıldız, 2014). 2013-2014 kuraklığı, 6 ay ve daha uzun zaman ölçekleri için hesaplanan Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI) dağılışı desenlerine bakıldığında açıkça görüleceği gibi, bir meteorolojik kuraklık olayı olmaktan çıkarak

İklimsel değişkenlik ise, “Tüm zaman ve alan ölçeklerinde iklimin ortalama durumunda ve standart sapmalar ile uç olayların gerçekleşme sıklık ve olasılıkları gibi öteki istatistiklerinde ortaya çıkan değişimlerdir.”



COVID-19 ve benzeri salgın hastalıklara karşı vücut direnci ve bağışıklık sisteminin önemi de yeniden daha kuvvetli bir biçimde dillendirildi. Bu durum, yenden tarım ve gıda güvenliği, gıda kalitesi ve gıdanın sürdürülebilirliği konusundaki uğraş ve etkinliklerimizi planlamamızı gerektiriyor.

birçok bölgede ve yörede tarımsal ve hidrolojik kuraklıklara dönüşmüştür (Türkeş, 2014).

IPCC (2013)'ye göre de "Birçok aşırı hava ve iklim olayında 1950'den beri değişimler olduğu gözlenmiştir." Yüksek olasılıkla, küresel ölçekte *soğuk gün ve gecelerin sayıları azalmış, sıcak gün ve gecelerin sayısı artmıştır.* Avrupa, Asya ve Avustralya'nın geniş bölgelerinde *sıcak hava dalgalarının sıklığı olasılıkla artmıştır.* Bu tür değişiklikler, genel olarak Doğu Akdeniz ve Türkiye'de, özellikle 1990'lı yıllarla birlikte donlu ve kar yağışlı günlerin belirgin bir şekilde azalması; önemli bir bölümü istatistiksel olarak anlamlı olmak üzere, *sıcak günlerin ve gecelerin sayıları ile gece en düşük ve gündüz en yüksek hava sıcaklıklarının artması; gündüz en yüksek-gece en düşük sıcaklık farklarının azalması şeklinde kendisini hissettirmiştir* (Türkeş ve Erlat, 2018, 2012, 2013; Türkiye ve ark., 2002; Türkiye ve Sümer, 2004; Kartum ve ark., 2011). Başka bir deyişle, Türkiye'de yaklaşık son 25 yıllık dönemde, hem sıcak rejimi belirgin olarak daha ılıman ve sıcak (çoğu bölgede tropikal) koşullara doğru değişmiş, hem de sıcak hava dalgalarının sıklığında ve şiddetinde önemli değişimler gerçekleşmiştir (Kuglitsch ve ark., 2010; Türkiye, 2013a; Türkiye ve Erlat, 2018, 2018b).

Bunlara ek olarak, *sera gazlarının atmosferik birikimindeki artışların, yüzey sıcaklıkları, alt troposfer hava sıcaklıkları, buharlaşma, bulut, yağış ve nem gibi değişkenlerde bölgesel ve küresel değişikliklere yol açması beklenmektedir.* Türkiye'de ve onu çevreleyen bölgeler için gelecek iklim ve iklim değişkenliğine ilişkin küresel ve bölgesel iklim model benzeştirmelerinin kestirimleri, Türkiye'de genel olarak *yağmur ve kar yağışlarının azalması, hava sıcaklıklarının, buharlaşmanın, sıcak hava dalgalarının ve kuraklık olaylarının sıklığı ve uzunluğunun artması* vb. önemli iklimsel değişimlerin olacağını ve Akdeniz havzasındaki birçok ülke ile birlikte gelecekte Türkiye'nin de iklim değişikliğinden olumsuz etkileneceğini gösterir (ör. IPCC, 2013; Türkiye, 2013b,

2014, 2018). Tüm bu nedenlerle, iklim değişikliğinin etkilerini önlemek ya da en azından azaltabilmek ve ona uyum açısından, Türkiye'nin gelecekteki ikliminin öngörülmesi yaşamsal bir önem taşır.

Hızla gelişen iklim modelleri, gözlenen kıtasal ölçekli yüzey sıcaklığı desenlerini ve onlara yıllık zaman ölçeklerindeki eğilimleri, 20'nci yüzyılın ortalarından beri gözlenmiş olan daha hızlı ısınma eğilimini ve büyük volkanik püskürmelerden hemen sonra ortaya çıkan soğumayı yeniden üretmektedir. İnsan etkisi, atmosfer ve okyanus ısınmasında, küresel su döngüsündeki değişikliklerde, kar ve buzdaki azalmalarda, küresel ortalama deniz düzeyi yükselmesinde ve bazı aşırı iklim olaylarındaki değişikliklerde saptanmıştır. İnsan etkisi *çok yüksek olasılıkla* 20'nci yüzyılın ortalarından beri gözlenen ısınmanın en önemli nedeni olmuştur (IPCC, 2013, 2018).

IPCC'ye (2013) göre, sera gazlarının sürmekte olan salımları, daha fazla ısınmaya ve başta buharlaşma ve yağış olmak üzere iklim sisteminin tüm bileşenlerinde değişikliklere neden olacaktır. İklim değişikliğinin sınırlandırılması, sera gazı salımlarının önemli ve sürekli azaltılmasını gerektirecektir. IPCC 2013'teki yeni senaryolara (Temsili Konsantrasyon Yolu - RCP) dayalı öngörülen iklim değişikliği, senaryo farklılıkları hesaba katıldıktan sonra, hem desenler hem de büyüklük açısından bir önceki IPCC Raporu'ndakine (2007) benzemektedir. Küresel yüzey sıcaklığı değişikliği, 21'nci yüzyılın sonuna kadar, biri (RCP2.6) dışında tüm IPCC senaryolarına (RCP'ler) dayanarak *olasılıkla* 1850-1900 dönemine göre 1.5 °C'yi ve iki yeni senaryoya (RCP6.0 ve RCP8.5) göre *olasılıkla* 2 °C'yi aşacaktır. Küresel ısınma, 2100 yılı sonrasında da sürecektir. Küresel ısınma ve yağış değişimleri, yıllar arası değişkenlikten on yıllık değişkenliklere kadar çeşitli değişkenlikler sergilemeyi sürdürecektir ve bölgesel olarak türdeş olmayacaktır.



Okyanuslar, 21'nci yüzyıl boyunca da ısınmalarını sürdürecektir. Yüzye de biriken ısı enerjisi, derin okyanusa doğru geçecek ve okyanus dolaşımını etkileyecektir. Arktik deniz buzu örtüsü *olasılıkla* azalmaya ve incelmeye devam edecek ve Kuzey Yarımküre ilkbahar kar örtüsü, küresel ortalama yüzey sıcaklığı yükseldikçe, 21'nci yüzyıl boyunca azalacaktır. Küresel ortalama deniz düzeyi 21'nci yüzyıl boyunca yükselmesini sürdürecektir. Tüm IPCC senaryoları, deniz düzeyi yükselmesinin oranının, artan okyanus ısınması ve buzullar/buz kalkanlarından artan kütle kaybı nedeniyle, *yüksek olasılıkla*, 1971-2010 döneminde gözlenen yükselmeyi geçeceğini göstermektedir. Dahası, iklim değişikliği, atmosferdeki CO₂'nin artışı daha da büyütürken, karbon döngüsü süreçlerini etkileyecektir. Karbonun okyanuslar tarafından daha fazla biriktirilmesi, okyanus asitliliğinin artmasına yol açacaktır. Bu noktada, küresel iklim değişikliğinin pek çok özelliğinin ve etkisinin, CO₂ ve diğer sera gazı salımları durdurulsa bile yüzyıllarca süreceğini hatırlatmak gerekir. Ayrıca bu olgu, insan kaynaklı sera gazlarının geçmiş, günümüz ve gelecek salımlarının neden olduğu yüzyıllarca sürece önemli bir iklim değişikliği yükümlülüğünün (ör. BM Kyoto Protokolü ve sonrası) de varlığını sürdüreceğini göstermektedir.

İklim değişikliği, örneğin artan ve şiddetlenen kuraklıklar, taşkın ve seller ve giderek daha değişken dolayısıyla öngörülmesi zorlaşan şiddetli hava ve iklim olayları ve afetleri yoluyla, küresel gıda üretimi ve gıda güvenliğine yönelik en büyük tehditlerden biridir. İklim değişikliği ayrıca -var olan tarımsal sorunlara ek olarak- tarımsal etkilikleri yani üretimi bazları tarım açısından çeşitli yönlere marjinal olan yeni alanlara girmeye zorlayacaktır (Türkeş, 2020). Bu ise daha fazla doğal ekosistemin ve habitatın tarım alanına dönüşmesi anlamına gelecektir. Küresel nüfusun 2100 yılında 11 milyara ulaşmasının beklendiği düşünüldüğünde (UN, 2019: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf), insan toplumları daha fazla gıdaya ve bu gıdayı üretebilmek amacıyla daha fazla araziye gereksinim duyacak ve çoğu potansiyel olarak negatif etkiye yol açan arazi kullanımı değişikliklerinin önünü açacaktır. **Başka bir deyişle arazi kullanımı değişikliği, iklim değişikliği** tehdidi ile birlikte en büyük risk sürücüsü ya da denetleyicisi olmaya adaydır. Bu ise insanı zoonoz hastalıklardan (ör. virüs salgınları) korumaya yardımcı olan biyoçeşitlilik kaybını hızlandırmaktadır (Türkeş, 2020).

Birleşmiş Milletler Hükümetlerarası Biyoçeşitlilik ve Ekosistem Hizmetleri Bilim-Politika Platformu (IPBES) geçen yıl küresel ekosistem ve biyoçeşitlilik konulu önemli bir rapor yayımlamıştı (IPBES, 2019: <https://ipbes.net/global-assessment>). Raporunda önümüzdeki on yıllarda 1 milyon türün yok olabileceği öngörüsünde bulunulmuş ve COVID-19'u yaşayıp tartıştığımız 2020 yılında çok daha

anamlı bir saptamayla, "biyoçeşitlilik kaybının Yerküre için iklim değişikliği kadar önemli bir tehdit", tanım (asıl olarak arazi kullanımı değişikliği) ise ana sürücü olarak değerlendirmişti. İklim değişikliği ise durumu daha da karmaşıklaştırmaktadır. Uluslararası düzeyde kullanılan bir terminoloji olarak, iklim değişikliği bir stres kaynağı ya da stres yapıcıdır. Eğer türlerin biyocoğrafi dağılışı (yayılma alanı), habitat dönüşümü ve parçalanması ya da iklim değişikliği nedeniyle daralır ya da genişler ve türler başka alanlara göç etmek zorunda kalırsa, alışık olmadıkları çevre koşulları ve iklim koşullarıyla karşı karşıya kalırlar. Bu durum, örneğin ilkbaharın daha erken gelmesi gibi bir değişiklik onların ekolojik toleransının dışında kalabilir ve bu durumda iklim değişikliği biyoçeşitlilik kaybının başlıca sürücüsü ya da denetleyicisi etmeni olabilir (Türkeş, 2020).

COVID-19 pandemisi gıda güvenliğinin bir kez daha ve çok açık bir biçimde toplumsal yaşamın birinci konusu olduğunu, öteki gereksinim ve ilişkilerin yeniden tarım ve gıda güvenliği bağlamında biçimlendirilmesinin yaşamsallığını başta BM ve FAO gelmek üzere uluslararası kuruluşların, ülkelerin ve toplumlarının önüne serdi (Türkeş, 2020). Yukarıda açıkladığımız şekilde, doğa, toprak, su, hava ve iklimin önemi ile **doğanın yasalarına uygun yaşamın önemi yeniden ortaya çıktı. COVID-19 ve benzeri salgın hastalıklara karşı viücut direnci ve bağışıklık sisteminin önemi de yeniden daha kuvvetli bir biçimde dillendirilir oldu. Bu durum, yeniden tarım ve gıda güvenliği, gıda kalitesi ve gıdanın sürdürülebilirliği konusundaki uğraş ve etkinliklerimizi planlamamızı gerektiriyor.** Ulusal ve uluslararası ilişkilerde tarım ve gıda güvenliği stratejik öncelikli olacaktır ve ilişkiler bu çerçevede yürütülecektir. Toprak varlığı, tohum çeşitliği ve niteliği, su kullanımını daha koruyucu, daha toplumcu ve ulusalcı bir duyarlılıkla ele alınacaktır. Doğa-insan ve sağlıklı beslenme ile çevre eksenli bir ilerleme ve kalkınma hedeflenecektir (Türkeş, 2020).

Hızla gelişen iklim modelleri, gözlenen kıtasal ölçekli yüzey sıcaklığı desenlerini ve onlara yıllık zaman ölçeklerindeki eğilimleri, 20'nci yüzyılın ortalarından beri gözlenmiş olan daha hızlı ısınma eğilimini ve büyük volkanik püskürmelerden hemen sonra ortaya çıkan soğumayı yeniden üretmektedir.

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN FİZİKSEL BİLİM TEMELİ-I

İklim İklim Sistemi ve İklim Değişikliği Nedir İklim Değişikliğinin Başlıca Nedenleri Nelerdir?

Murat TÜRKEŞ*

Öz: Küresel iklim yaklaşık 4.6 milyar yıl yaşındaki Yerküre'nin oluşumundan günümüze değin, tüm alan ve zaman ölçeklerinde önemli değişiklikler ve değişimler göstermiştir. Bu değişiklikler sırasında, Dünya'nın ve oluşmaya başladığı ilk zamanlardan beri Anadolu'nun fiziki coğrafyasında (yeryüzü şekilleri, hava ve iklimi, toprak ve bitki örtüsü, yüzey ve yeraltı suları, akarsu ve gölleri, buzulları, ekosistem, biyom ve biyolojik çeşitliliği, vb.) da çok önemli ve büyük değişiklikler gerçekleşmiştir. Küresel iklim, atmosfer (havaküre), hidrosfer (suküre), buz küre, litosfer (taşküre) ve biyosfer (yaşamküre) olarak adlandırılan başlıca beş bileşeni bulunan ve bu bileşenler arasındaki karşılıklı etkileşimleri de içeren çok karmaşık bir sistemdir ve kısaca iklim sistemi olarak da adlandırılır. Bu kapsamda, iklimin kendi doğal değişkenliğinin dışındaki değişikliklere yol açan dış zorlamalar ve etmenler, iklim sisteminin alt sistemleri ile etkileşim içinde bulunan ve onlardan etkilenen değişiklikleri, örneğin Yerküre'nin katı kabuğundaki levha hareketleri ve volkanik püskürmeler, Güneş etkinliklerindeki değişimler ve Yerküre – Güneş arasındaki astronomik ilişkilerdeki değişiklikler gibi doğal olaylar ile asıl olarak sanayi devrimiyle birlikte atmosferin bileşimindeki antropojen (fosil yakıt kullanımı, ormanların yok edilmesi vb. gibi insan etkinlikleri) değişiklikleri içerir. Başka bir deyişle, dış zorlama ve etmenlerin neden olduğu iklim değişimleri, iklim sisteminin dışındaki doğal olaylar ile antropojen zorlama ve etmenlerin denetiminde ve etkisiyle gelişir. Astronomik ilişkiler, Milankovitch döngüleri olarak da adlandırılan bir dizi dönemsel değişiklikleri içermekte ve uzun dönemli iklim değişimlerinin açıklanması açısından önemli kanıtlar sunabilmektedir. Bu makalenin ana amacı, iklim değişikliğinin kavramsal ve kuramsal olarak ne olduğunu, iklim değişikliğinin kapsamını, nedenlerini ve anlaşılmasını ana çizgileri ile tartışmak ve iklim değişikliği konusunun bilimsel bir çerçeveye (iklim değişikliğinin fiziksel bilim temeli) oturmasını sağlamak olarak özetlenebilir.

Anahtar sözcükler: fiziki coğrafya, yerküre, levha tektoniği, iklim sistemi, iklim değişikliği ve değişkenliği; milankovitch döngüleri

What are Climate, Climate System and Climate Change? What are The Major Causes of Climate Change?

Abstract: Global climate has undergone significant changes and alterations at all spatial and temporal scales since the formation of our planet which is now 4.6 million years old. In this process the physical geography (landforms, weather and climate, soil and vegetation, surface and groundwater, streams and lakes, glaciers, ecosystem, biome and biological diversity, etc.) Anatolia too has undergone important and large-scale changes. Global climate is an extremely complex system with its five major components known as atmosphere, hydrosphere, cryosphere, lithosphere and biosphere which entail their interaction as well and together make up the climate system. In this context, external forces and factors apart from climate's own natural variability encompass changes that are in interaction with and affected by sub-systems of climate system. Examples include natural events such as plate tectonics and volcanic eruptions, changes in solar activities and in astronomic relations between planet earth and sun, and more importantly anthropogenic changes in the composition of atmosphere (i.e. as a result of human activities such as fossil fuel use, deforestation, etc.). In other words, climate changes caused by external forces and factors develop under the control and impact of natural events external to climate system as well as anthropogenic forces and factors. Astronomic relations cover a series of periodic changes named as Milankovitch Cycles which can provide significant evidence for explaining climate changes in long-term. The main objective of this article can be summarized as explaining and discussing what conceptually and theoretically climate change is including its scope and placing the issue of climate change in a scientific framework (physical science basis of climate change).

Key words: physical geography, planet earth, plate tectonics, climate system, climate change and variability, milankovitch cycles.

1. Giriş

Giriş bölümüne konuyla ilgili olan ve birbirleriyle karıştırılmaması gereken dört önemli kavramın tanımlanmasıyla başlamakta yarar görmekteyiz.

Bunlardan birincisi olan **hava**, "herhangi bir yerde ve zamandaki atmosfer koşullarının kısa süreli durumudur".

İklim ise, çok genel olarak "herhangi bir yerdeki ortalama hava koşulları" biçiminde tanımlanabilir (**Türkeş, 2008a; Türkeş, 2008b**).

Ancak, iklim teriminin, uzun süreli klimatolojik ve meteorolojik gözlemler süresince kaydedilen uç

*Prof. Dr., Boğaziçi Üniversitesi İklim Değişikliği ve Politikaları Uygulama ve Araştırma Merkezi Yönetim Kurulu ve Fizik Bölümü Yarı Zamanlı Öğretim Üyesi (ORCID No: 0000-0002-9637-4044)

Geliş Tarihi / Received : 10.03.2019
Kabul Tarihi / Accepted : 28.05.2019

değerleri, onların istatistiksel oluşma olasılıklarını ve tüm değişkenlik özelliklerini de içermesi gerekir. Bu yüzden, günümüzde **iklim**, "belirli bir alandaki hava koşullarının, atmosfer öğelerinin değişkenlikleri ve ortalama değerleri gibi uzun süreli (geleneksel olarak 30 yıl ve daha fazla) istatistikleri ile tanımlanan bireşimi" şeklinde de tanımlanır olmuştur (ör. **Türkeş, 2010, Türkeş, 2012a**). Bu yeni tanımda geçen 'bireşim' terimi, ortalama teriminden daha fazlasını içerir.

İklim değişikliği, "iklimin ortalama durumunda ya da onun değişkenliğinde onlarca ya da daha uzun yıllar boyunca süren istatistiksel olarak anlamlı değişimler" olarak tanımlanabilir.

Dördüncü önemli kavram durumundaki **iklimsel değişkenlik** ise, "tüm zaman ve alan ölçeklerinde iklimin ortalama durumunda ve standart sapmalar ile uç olayların gerçekleşme sıklık ve olasılıkları gibi öteki istatistiklerinde ortaya çıkan değişimler" şeklinde tanımlanabilir (**Türkeş, 2008a ve 2008b**).

İklim değişikliği ve iklim değişkenliği (iklimsel değişebilirlik), iklim sistemi içerisindeki doğal iç süreçlere ya da insan (antropojen) ve doğal kaynaklı dış zorlama etmenlerindeki değişimlere bağlı olarak oluşabilir.

2. Fiziksel iklim sistemi, bileşenleri ve işleyişi

Yerküre'yi saran atmosfer, sürekli hareket halindedir. Hareketin ölçekleri ısı enerjisi üreten molekül- den, basınç ve rüzgâr sistemlerini üreten küresele kadar değişmektedir. Tüm ölçeklerde gelişen bu hareketlerin kendisi de, atmosferin yapısında ve bileşiminde çok daha önemlisi bulut ve yağışların oluşumlarını sağlayan su ve su buharı döngüsünde (hidrolojik döngü) değişmelere neden olmaktadır. Tüm bu hareketler ve onların etkileri, günümüzde klimatolojinin asıl konuları arasındadır.

2.1 Fiziksel iklim sistemi düşüncesi

Atmosferin enerji özelliklerinin ayrıntılı olarak incelenmesi de, tüm klimatolojiyi oluşturan ve düzenleyen geniş bir çerçeve olduğu için **fiziksel iklim sistemi** kavramının daha iyi anlaşılması açısından önemli bir üstünlük sunmaktadır. Tüm atmosfer hareketlerinin enerji kaynağı Güneş'tir. Güneş'ten gelen enerji (Gelen Kısa Dalga Boylu -GKDB- Güneş ışınımı) atmosferi geçerek yeryüzüne ulaşır. Güneş enerjisinin atmosferden geçişi sırasında çok az enerji emilir ve bu da atmosferin ısınmasına harcanır. Ancak, enerjinin çoğu yüzeyde soğurulur. Önce yüzey ısınır ve sonra üzerindeki havayı ısıtır. Bu da,

yeryüzünü atmosfer için ana ısı kaynağı yapmaktadır (**Türkeş, 2010**). Isınmanın tutarı, günün ve yılın zamanı kadar yüzeyin şekline ve özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Bu yüzden, ısınma tutarı alansal ve zamansal olarak değişir. Güneş'ten salınan ve yeryüzüne ulaşan enerjinin eşitsiz dağılımı, rüzgâr olarak bildiğimiz yatay hava hareketlerini ve bulutlar ile yağışları oluşturan dikine hava hareketlerinin doğrudan oluşmasına neden olur. Sonuç olarak, Güneş'ten gelen ve atmosferde çeşitli süreçlere katılan enerji, uzaya geri döner. Bu yüzden, fiziksel iklim, atmosferin içindeki ve atmosfer ile yeryüzü arasındaki bir dizi enerji dönüşümleri ve karşılıklı enerji alışverişleri olarak görülür. Bu enerji dönüşümleri ve alışverişleri, enerjiyi Yerküre üzerinde dağıtan ve Güneş'ten alınan enerji kadar uzaya enerji göndererek bir enerji dengesi düzenleyen önemli bir görev üstlenmektedir. İklim sistemini yöneten Güneş enerjisi çeşitli zaman ölçeklerinde değişmektedir (**Türkeş, 2017**). Bu nedenle, iklim de değişmektedir. Günlük değişkenlik, mevsimsel kaymalar ve bir yıl ile sonraki yıl arasındaki farklılıklar (yıllar arası değişkenlik), iklimin bilinen ve görünen yanlarıdır ve bunların insan etkinlikleri üzerinde önemli etkileri vardır.

Örneğin, küresel ortalama sıcaklıktaki uzun süreli artış, sanayi devriminden beri özellikle son yarım yüzyılda sera gazlarının atmosferdeki hızla artan birikimlerinden kaynaklanan küresel ısınma konusunda ciddi kaygılar doğurmuştur. Öte yandan, insan etkinliklerinin atmosferi etkilemesinden önceki atmosfer bileşiminin, hızlı bir artış ya da azalış eğiliminden çok uzun süreli dalgalanmalar gösterdiği, Yerküre'nin varlığını sürdürdüğü dönem süresince atmosferin yavaşça evrimleştiği ve bunun da iklimi etkilediği anlaşılmıştır (**Türkeş, 2017**).

GKDB Güneş enerjisinin dağılımındaki alansal değişimlerin yanı sıra, günlük ve mevsimlik değişimlerin sonucunda yeryüzünün çevresindeki enerji dağılımında da sürekli değişiklikler olmaktadır. Ancak, genel olarak ekvatorial ve tropikal bölgeler en fazla, kutup bölgeleri ise en az enerji almaktadır. Güneş enerjisinin yeryüzündeki bu eşitsiz dağılımının sonuçları, ilerideki bölümlerde ayrıntılı olarak görüleceği gibi, iklim açısından önemli sonuçlar yaratmaktadır (**Türkeş, 2010; Türkeş, 2017**).

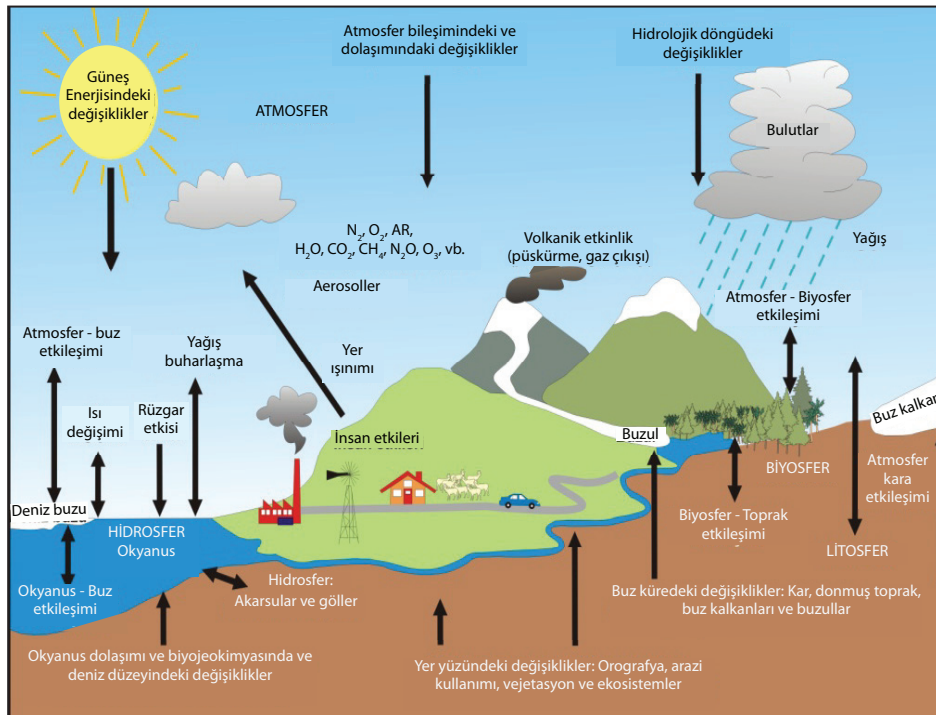
Enerji akışlarıyla bağlantılı tüm bu süreçler, fizik yasalarına bağlıdır ve çoğunlukla matematiksel terimlerle açıklanır. Gerçekte, iklimin matematiksel modellerinin gelişimi, iklim süreçlerine ilişkin artan bilgilerimiz ve gelişmekte olan iklim gözlemleri için

kullandığımız ana yollardan birisidir. İklim modelleri, hem fiziksel iklim sistemini anlama düzeyimizi yükseltir, hem de gelişmiş iklim öngörülerini yapma yeteneğimizi kuvvetlendirir.

Sonuç olarak, ister sistemin herhangi bir parçasındaki bir iç değişiklikten, isterse dış zorlamadan olsun, iklim sistemi bileşenlerinin herhangi birisinde ortaya çıkan değişiklikler, iklimin de değişmesine neden olur. Bu yüzden iklimin, enerjinin karşılıklı içsel değişimlerindeki ya da iklim sisteminin iç dinamiklerindeki bozulmalar sonucunda değişebileceği söylenebilir. Örneğin, etkileri küresel ölçekte gözlenen atmosfer-okyanus birleşik olaylarının iyi bilinen örneklerinden biri olan, El Niño-Güney Salınımı (EÑSO) sıcak olayları, Büyük Okyanus'ta özellikle tropikal orta ve doğu bölgelerinde okyanus ve atmosfer arasında gelişen karşılıklı etkileşimlerden ortaya çıkar. Bu doğa olayları, iklim sisteminin bir parçasıdır ve şiddetli yağışlar, taşkınlar ve kuraklıklar gibi hava olaylarında, Dünya'nın her yerinde yıldan yıla geniş alanlı ve önemli değişimler oluşmasına neden olmaktadır. Ancak iklim, çoğu zaman, daha uzun zaman ölçekleri ile değerlendirilir. EÑSO olayları, uzun süreli zaman ölçeklerinde ortalama istatistiklerde kaybolmasına karşın, değişkenlik ölçülerinde daha kuvvetli olarak belirginleşir. Ancak ortalama iklimin de değişkenlikten etkilendiği unutulmamalıdır (Türkeş, 2010; Türkeş, 2017).

2.2 Fiziksel iklim sisteminin bileşenleri

Yerküre'nin herhangi bir yerinde gözlenen ya da yaşanan iklim, fiziksel iklim sisteminin çeşitli asal bileşenleri ya da alt sistemleri arasındaki karmaşık etkileşimlerin bir sonucudur (Şekil 1). Kolayca anlaşılabilir gibi, iklim, fiziksel iklim sisteminin alt sistemleri ile etkileşim içinde bulunan ve onlardan etkilenen atmosfer değişimlerini ve 'dış' etmenleri içerir. İklim sistemindeki içsel interaktif bileşenler, atmosferi, okyanusları, deniz buzunu, kara yüzeyini ve özelliklerini (yer şekilleri, bitki örtüsü, albedo, canlı kütle ve ekosistemler), kar örtüsünü, karasal buzulu (dağ buzullarını, Antarktika ve Grönland'daki buzul kalkanlarını) ve hidrolojiyi (nehirleri, gölleri, yüzey ve yer altı sularını) içermektedir. Bu ana bileşenler, atmosferik süreçleri kuvvetli bir biçimde etkileme gücüne sahiptir. Atmosferin kendisi söz konusu olduğunda, birçok özelliğinin kendi gaz bileşimince etkilendiği görülür. Atmosferin gaz bileşimi ise, yeryüzündeki hayvan ve bitki yaşamından etkilenir. Örneğin, insan etkinlikleri, özellikle karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), diazotmonoksit (N_2O) ve ozon (O_3) gibi eser gazların atmosferik birikimlerini doğrudan etkiler. Işınımsal olarak etkin eser gazlar, başka bir deyişle sera gazları Yerküre'yi çevreleyen atmosfer kütlelerinin yalnız %0.4'ünü içermesine karşın, bu gazlar doğal ve insan kaynaklı sera etkisi ile ilgili birçok önemli görevi yüklenmektedir.



Şekil 1. Fiziksel iklim sisteminin asal bileşenleri (alt sistemleri), süreçleri ve karşılıklı etkileşimleri (Türkeş 2010; Le Treut ve ark. 2007'na göre yeniden çizildi ve düzenlendi).

Atmosferin bileşimindeki önemli değişimlerden birisi de, atmosferde su buharı, sıvı su ve buz kristalleri içeren bulutlar ve dolu şeklinde çeşitli evrelerde bulunan sudur (H_2O). Ancak atmosferin ve okyanusların öteki oluşumları da değişebilir. Bu nedenle, atmosfer kimyası, deniz biyokimyası ve kara yüzeyindeki karşılıklı etkileşimler ve değişiklikler vb. konular öncelikli alanlar olarak önem kazanmaktadır.

Normal koşullarda iklim sistemine göre 'dış' olarak nitelendirilen bileşenlerse, Güneş'i ve enerjisini, Yerküre'nin eksen çevresindeki dönüşünü, Güneş-Yer geometrisini, Yerküre'nin yörüngesini, kara ve deniz dağılımını, karaların fiziki coğrafi özelliklerini, okyanus tabanı topografyasını ve havza şekillerini, atmosfer ve okyanusların temel bileşimini ve kütlesini içerir. Bu bileşenler, doğal nedenler ile değişebilen 'ortalama' iklimi belirlemektedir. Gelen kısa dalga boylu Güneş ışınımındaki ya da Yerküre'nin yüzeyinden salınan uzun dalga boylu kızıl ötesi ışınımındaki dalgalanmalar nedeniyle, atmosferin dış yüzeyine ulaşan ortalama net ışınımındaki herhangi bir değişiklik, sistemin ışınımsal zorlanması olarak bilinen süreci etkiler. Güneş'ten gelen ışınım enerjisindeki değişiklikler ve yanardağ püskürmesi gibi doğal olaylar nedeniyle atmosferin bileşiminde oluşan değişiklikler, konuyla ilgili başlıca olası değişiklikler arasında sayılabilir. Öteki dış zorlamalar, sera gazlarının salımlarındaki buna bağlı olarak da sera gazlarının atmosferdeki birikimlerinde gözlenen artışlar gibi insan etkinlikleri sonucunda oluşabilir.

2.3 İklim geribeslemeleri ve zorlamaları

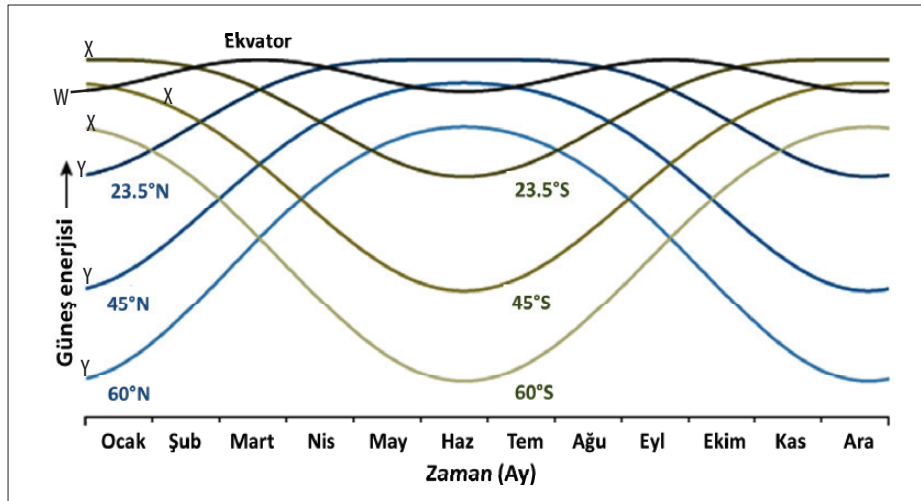
Küresel iklim sisteminin çalışmasını ve sürekliliğini sağlayan yakıt, GKDB Güneş ışınlarıdır (bkz. Şekil 2). Bu çerçevede, Yerküre'nin ışınım dengesini değiştirebilen asıl etmenleri, üç grupta toplayarak tartışabiliriz (Türkeş, 2016; Türkeş, 2017):

1. GKDB yüksek enerjili Güneş ışınımının yeryüzü ile yaptığı açının, şiddetinin ve coğrafi dağılımlarının değişmesi. Bu durum, örneğin, Yerküre'nin eksen eğikliğinde, yörüngesinin biçiminde ya da doğrudan Güneş etkinliklerinde ortaya çıkan değişiklikler yoluyla gerçekleşebilir.

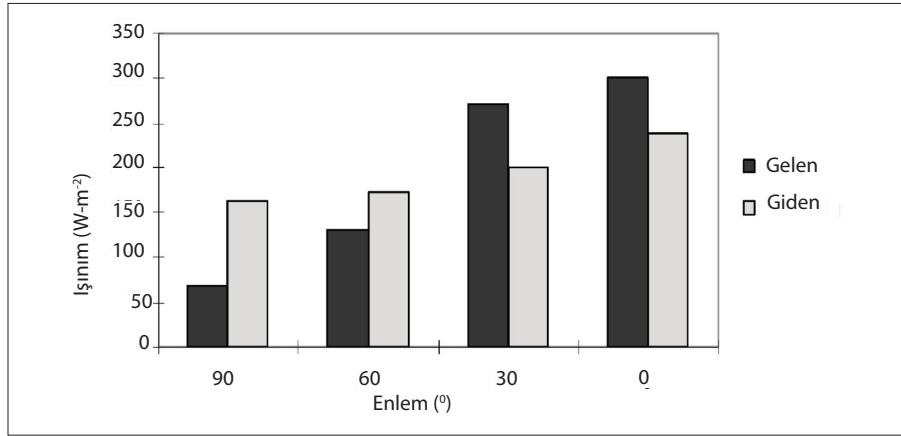
2. Güneş ışınımının çoğunlukla yeryüzünden ve atmosferden yansıtılma oranı olarak tanımlanan 'albedo'nun değişmesi. Bu durum, örneğin, bulut örtüsü ve atmosferde asılı durabilen uçucu küçük parçacıklardaki ve Yerküre'nin vejetasyon, kara ve deniz buz ve buzulları, pürüzlülük, nemlilik gibi yüzey özelliklerindeki değişiklikler yoluyla gerçekleşebilir.

3. Yerküre'den geriye atmosfere ve uzaya doğru salınan giden uzun dalga boylu (GÜDB) yer ışınımının tutarının değişmesi. Bu durum, örneğin, atmosferdeki sera gazlarının birikimlerinin değişmesi yoluyla oluşabilir.

İklim ise, ortaya çıkan böyle değişiklikleri çeşitli geribesleme düzenekleri yoluyla doğrudan ve dolaylı olarak yanıtlar.



Şekil 2. Yeryüzünün farklı enlemlerde Güneş'ten aldığı doruk enerji (GKDB ışınım) tutarının (ör. W/m^2) yıl içindeki değişimi (<https://www.earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page3.php>). Grafik, yılın her günü yerel saatle öğleyin aldığı Güneş enerjisinin enleme göre değişimini gösterir. Koyu gri (W) renk çizgiyle gösterilen Ekvator'da, doruk enerji yıl içinde çok az değişirken, yüksek kuzey (Y) ve yüksek güney (X) enlemlerde yıl içindeki (mevsimsel) değişme çok fazladır.



Şekil 3. Yerküre'nin, başlıca coğrafi kuşaklara göre alansal yıllık ortalama ışınım bütçesi. Bütçenin öğelerini daha kolay karşılaştırılabilmek amacıyla, yıllık GKDB (koyu) ve GUDB ışınım (açık) değerleri farklı tonlamayla gösterilmiştir. Buna göre Ekvatorial, tropikal ve subtropikal kuşaklarda net bir enerji fazlalığı varken, orta enlemler, subpolar kuşak ve kutuplarda net bir enerji açığı görülür. Ayrıntıda ise, Ekvator'daki net ışınım fazlası 68 W/m² dolayında olmasına karşın, net ışınım açığı Güney Kutbu'nda -100 W/m², Kuzey

Küresel ortalama 342 W/m² düzeyindeki GKDB Güneş enerjisi alan ve zamanda önemli değişim gösterir (Şekil 2). Yıllık GKDB Güneş enerjisi tutarı hem Ekvator ve tropikal enlemlerden kutuplara doğru azalmakta, hem de Ekvator'da yıl içinde çok az değişirken, yüksek kuzey ve yüksek güney enlemlerde önemli mevsimsel değişime göstermektedir.

Şekil 3, Yerkürenin Ekvatorial, subtropikal ve ortaenlem-subpolar kuşaklar ile kutup bölgelerinin, Kuzey ve Güney Yarımküre ayrımı yapılmaksızın yıllık ortalama ışınım bütçesini gösterir. Dünyamız bir küre olduğu ve buna bağlı olarak GKDB Güneş ışınları (görünür ışık) ekvatorial bölgede ve tropiklerde yıl boyunca atmosfere daha dik bir açıyla geldiği için, bu bölgeler, orta enlem, kutupaltı ve kutup bölgelerine göre (net ışınım negatif) yıl boyunca daha fazla Güneş enerjisi alır (net ışınım pozitif). Ekvatorial ve tropikal bölgelerde alınan fazla enerji, geniş ölçekli atmosfer ve okyanus dolaşimleri yoluyla, özellikle gezici cephesel alçak basınç sistemlerinin (orta enlem siklonları) yardımıyla daha yüksek enlemlere taşınır. Ayrıca, bu enerjinin deniz ve kara yüzeylerindeki suyu da buharlaştırması gerekir (Türkeş, 2016). Suyun buharlaşması sırasında kullanılan ve 'gizli ısı' olarak adlandırılan bu enerji (buharlaşma gizli ısısı), havadaki su buharının çeşitli yükselmeyle soğuma düzenek ve süreçleriyle yoğunlaşarak bulutları oluştururken geri salınır (yoğunlaşma gizli ısısı). Atmosfer dolaşımı, birincil olarak bu yoğunlaşma gizli ısısının salınmasıyla yönetilir. Atmosfer dolaşımıysa, okyanusların yüzey suları üzerindeki rüzgâr hareketlerinin yanı sıra, okyanus yüzey sıcakları, yağış ve buharlaşma ilişkileri yoluyla tuzlulukta

ortaya çıkan değişiklikler aracılığıyla okyanus dolaşımını ağırlıklı olarak yönetir (Türkeş, 2017). Bu ilişkiler, gerçekte iklim sistemini oluşturan öteki alt sistemlerdeki değişikliklerden de etkilenir ve onları etkileme gücüne sahiptir.

İklim sistemindeki süreçler arasında gelişen karşılıklı bir etkileşim düzeneği, bir başlangıç sürecinin (ya da ilk süreç) etkisi sonucu bu ilk süreci etkileyecek olan ikinci bir süreçte değişikliklerin oluşmasına ya da ortaya çıkmasına yol açtığına, iklim geribeslemesi olarak adlandırılır. Geribesleme düzenekleri, pozitif ve negatif olarak ikiye ayrılarak değerlendirilir. Bir pozitif geribesleme orijinal (ilk) süreci kuvvetlendirirken, bir negatif geribesleme süreci zayıflatır. İklim geribeslemesi, iklim duyarlılığını belirleyen geribesleme etmenlerinin toplamı olarak da kabul edilir (Türkeş, 2016).

İklim sisteminde, iklimsel zorlamadaki bir değişikliğin sonuçlarını ve/ya da etkilerini kuvvetlendiren (pozitif) ya da zayıflatıp azaltabilen (negatif) birçok geribesleme düzeneği vardır. Örneğin, fiziksel iklim sistemi, birçok geribesleme ile ortaklaşa çalışır ve bu geribeslemeler sistemin pek çok davranışından ve değişiminden sorumludur. Bir pozitif geribesleme ya da ışınımsal zorlama 'sinyali' ısınmayı kuvvetlendirirken, bir negatif geribesleme ya da ışınımsal zorlama 'sinyali' zayıflatır. İklim geribesleme etmen ve düzeneklerinin doğasının iyi anlaşılması ve niceliğinin doğru olarak belirlenmesi ve kestirilmesi, Yerküre ikliminin karmaşıklığını inceleyen ve onu çözmeye çalışan bilimcilerin odaklandıkları en önemli araştırma konularından biridir.

İklim geribesleme etmenleri, genel olarak dört ana grup altında toplanarak incelenebilir (**Türkeş, 2016**). Bunlar:

1. Atmosferdeki birikimleri insan etkinliklerinden etkilenen ve bu yüzden değişen karbondioksit (CO₂) ve öteki sera gazlarının geribeslemeleri;
2. Su buharı geribeslemesi;
3. Buz-albedo geribeslemesi;
4. Bulut-albedo ya da bulut zorlama geribeslemesi.

2.3.1 Birikimleri değişen CO₂ ve öteki sera gazlarının geribeslemeleri

CO₂ ve öteki sera gazlarının (CH₄, N₂O, CFC'ler, vb.) geribeslemeleri, kendilerinin var olan egemen ışımsal zorlaması ve ilişkili sera etkisi ısınmasıyla kuvvetli düzeyde bağlantılıdır. Örneğin, sera gazlarının atmosferdeki birikimlerinin artması, yüzey ve alt atmosfer hava sıcaklıklarının artması yoluyla Yerküre ikliminin daha sıcak olmasına yol açar (küresel ısınma). Bu ısınmaya koşut olarak da, kar ve buz/buzul örtüleri erimeye başlar (**Türkeş, 2016**).

2.3.2 Su buharı geribeslemesi

Su buharı geribeslemesi, havadaki su buharı basıncının hava sıcaklığıyla ilgilenecek sıcaklık aralığında (K) yaklaşık %7 oranında üstel olarak arttığını açıklayan *Clausius-Clapeyron* eşitliğinin bir sonucu olarak, iklim duyarlılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (**Türkeş, 2010; Türkeş, 2017**). Artan yüzey (kara ve deniz) hava sıcaklıkları nedeniyle buharlaşmadaki artışa bağlı olarak, atmosferdeki su buharında (ve su buharı basıncında) oluşan bir artış, pozitif geribesleme için iyi bir örnektir. Su buharı önemli bir sera gazıdır ve bu nedenle de su buharı birikimindeki herhangi bir artış, özellikle böyle bir ısınma sürecinin başında doğal sera etkisini kuvvetlendirerek daha fazla ısınmaya yol açar. Bunun dışında, su buharı geribeslemesinin kuvveti hava sıcaklıklarındaki yükselişle artar ve kuvvetlenen su buharı geribeslemesi hidrolojik döngüyü hızlandırarak aşırı yağışlar, sel ve taşkınlar, gökgürültülü fırtınalar ya da hortumlar ve kuraklık olayları gibi bağlantılı hava ve iklim olaylarının oluşmasına yol açabilir (**Türkeş ve Erlat, 2018**).

2.3.3 Buz-albedo geribeslemesi

Kar örtüsü ile kara ve deniz buzullarının ve buzlarının erimesi sonucunda, bu örtünün altından açığa çıkan daha koyu renkli kara ve su yüzeylerinin daha fazla gelen kısa dalga boylu Güneş ışınımı emerek

yüzey albedosunu (yüzeydeki cisim ve maddelerin gelen Güneş ışınımını yansıtma oranı, %) azaltması da, daha fazla ısınmaya neden olur. Bu bir pozitif geribeslemedir (**Türkeş, 2016; Türkeş, 2017**). Ortaya çıkan daha fazla ısınma daha fazla erimeye, azalan albedo ise daha fazla ısınmaya neden olan ve kendini yöneten bir döngünün oluşmasına yol açar. Buz-albedo geribeslemesi olarak da bilinen bu geribesleme döngüsü, atmosferdeki birikim düzeyleri artan sera gazlarının neden olduğu kuvvetlenen sera etkisinin oluşturduğu başlangıçtaki ısınmayı kuvvetlendirdiği için pozitif bir geribesleme etmenidir. Bu albedo geribeslemesi, açık bir biçimde mevsimseldir ve Yerküre'nin yüksek enlemlerindeki bulutların, karasal yüzey hidrolojisinin ve vejetasyonun özelliklerine ve/ya da davranış tarzına yakından bağlıdır (**Türkeş, 2016; Türkeş 2017**).

2.3.4 Bulut-albedo geribeslemesi

Bulut-albedo ya da bulut zorlama geribeslemesi, bulut çeşitlerinin farklı atmosfer yükselti düzeylerindeki (çoğunlukla troposferde) varlığı ya da yokluğunun yarattığı etkiler ile yakından ilişkilidir. Bulut geribeslemesi temel olarak, bulutlar olmasaydı Yerküre'nin yüzeyince emilecek olan kısa dalga boylu Güneş ışınımının bulut örtüsü tarafından yansıtılan kısmıyla ve onların atmosferin doğal sera etkisine yaptıkları önemli katkıyla ilgilidir (**Türkeş, 2016; Türkeş 2017**).

Bulutlar, bulut türüne bağlı olarak Yerküre'nin ısınması açısından pozitif ya da negatif bir geribesleme oluşturabilir. Kuramsal olarak, bulut-albedo geribeslemesi ile bağlantılı ısınmaya yol açan bir pozitif geribesleme, genel olarak alt atmosferin (troposfer) yüksek düzeylerindeki bulut (sirrüs türü bulutları) oluşumundan kaynaklanırken, soğumaya neden olan negatif geribesleme alçak düzeylerdeki bulut (stratüs türü bulutlar) oluşumlarından kaynaklanır. Öte yandan böyle bir genellemenin yapılabilmesi, ancak hava sistemlerinin (örn. ani gelişen sıcak ya da soğuk adveksiyonlar, cephe geçişleri, vb.) ve gece-gündüz etkilerinin göz ardı edilmesiyle olanaklıdır (**Türkeş, 2016; Türkeş 2017**).

Giden uzun dalga boylu yer ışınımını azaltan ve bu yüzden de bir pozitif ışımsal zorlama oluşturan etmenler, temel olarak atmosferdeki karbondioksit birikiminde gözlenen belirgin artışları içerir. Gelen Güneş ışınımını azaltan ve negatif ışımsal zorlamayı oluşturan etmenler, 1991 yılında Filipinlerdeki Pinatubo Dağı'nın püskürmeleri sırasında olduğu gibi üst atmosfere önemli oranlarda gaz ve kül salınmasına yol açan kuvvetli yanardağ püskürmelerini içerir.

Negatif ışınımsal zorlama, insan etkinlikleri sonucunda da, örneğin sanayiden ve enerjiden kaynaklanan her çeşit uçucu küçük parçacıkların salınmasından sonra oluşabilir. Gerçekten enerjiden (ör. fosil yakıtların yakılmasından) ve sanayiden kaynaklanan uçucu parçacıkların, özellikle sülfat (SO₄-2) parçacıklarının oluşturduğu negatif ışınımsal zorlama, yeryüzüne ulaşan Güneş ışınımını azaltarak, normal koşullarda son 20-30 yılda Kuzey Yarımküre'de oluşması gereken önemli ısınmayı bir ölçüde zayıflatmış olabilir (Türkeş, 2016; Türkeş 2017).

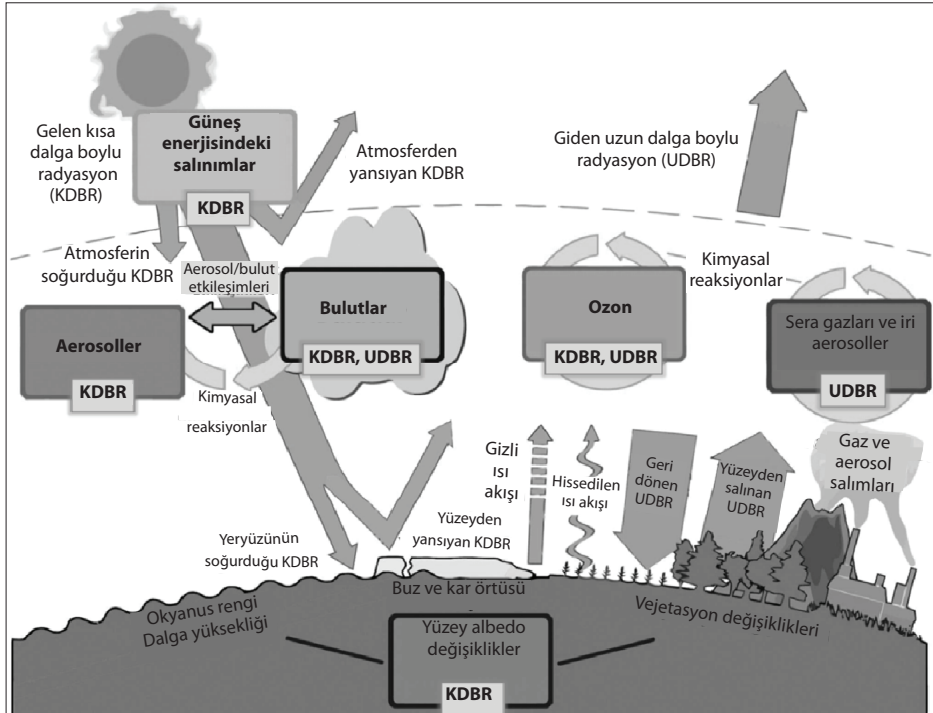
Atmosfer, iklim sisteminin içerisinde biyosfer ve hidrosfer (özellikle okyanuslar) ile birlikte değerlendirilir. Bu yüzden kara yüzeyindeki biyosfer, örneğin ormanlar, CO₂'yi fotosentez yoluyla atmosfere uzaklaştırdığı için bir karbon yutağı olarak kabul edilir (Şekil 1). Ormanların geliştirilmesi, süreç içerisinde atmosfere daha fazla CO₂ uzaklaştırarak ve bunun sonucunda sera etkisini azaltarak, atmosferdeki artan CO₂ birikimine yönelik yanıtları da artırır. Bu önemli bir negatif geri beslemedir. Okyanuslar da etkili bir yutak görevi yapar; ama bu, hem CO₂ hem de derin okyanus katmanlarında tutulan ısı içindir. Okyanuslardaki ikinci yutak süreci, bir dengeye ulaşmaya kadar hava sıcaklıklarındaki yükselmeyi yavaşlatır. Burada sözü edilen çeşitli etkileşimlerin zaman ölçekleri, birkaç günden milyonlarca yıla kadar değişebilmektedir (Türkeş, 2016; Türkeş 2017).

Atmosfer ve okyanus arasındaki yaygın ve geniş alanlı bir etkileşimi içeren EÑSO olayı, düzensiz doğal iklim dalgalanmalarına iyi bir örnek oluşturur. EÑSO, tropikal Pasifik Okyanusu'ndaki egemen güneydoğu alize rüzgârlarında ve sıcak yüzey sularının akışında değişiklikler oluşturur. EÑSO olayı, bölgedeki mevsimsel hava olaylarını etkilediği gibi bölgesel iklim değişimlerini de etkiler. Son 30 yılda yapılan araştırmalar, EÑSO olaylarının Güney Yarımküre dışındaki iklimsel sapmalar ve salınımlar ile de bağlantılı olduğunu göstermiştir. Bu yüzden EÑSO olayları, etkileri açısından küresel bir doğa olayı olarak kabul edilir (Türkeş, 2000; Türkeş, 2010).

3. Küresel iklim değişiklikleri ve nedenleri

3.1. İklim değişikliğinin ana yönlendiricileri

Atmosferdeki birikimleri (konsantrasyon) değişken, pek çok insan etkinliğinden etkilenen ve doğal sera etkisi düzeneğinin çalışmasından sorumlu olan başlıca doğal sera gazları, CO₂, su buharı (H₂O), N₂O, CH₄ ve O₃ ile insan ürünü (yapay) kloroflorokarbonlar (CFC'ler), hidroflorokarbonlar (HFC'ler), perflorokarbonlar (PFC'ler) ve bunların çok çeşitli türevlerini içerir. Şekil 4, Güneş'ten atmosferin üst sınırına ulaşan (gelen, G) kısa dalga boylu radyasyondan (KDBR) ve yeryüzünden salınan (giden, G) uzun dalga boylu radyasyondan (UDBR), aerosoller, bulutlar, ozon katmanı, sera gazları ve iri aerosollerin iklim sistemi ile olan etkileşimleri ve ışınımsal



Şekil 4. İklim değişikliği ana yönlendiricilerinin çizimsel gösterimi (Cubasch ve ark. 2013'na göre yeniden çizildi ve düzenlendi).

zorlamalarına, yeryüzündeki ve atmosferdeki enerji akılarından yeryüzündeki albedo ve vejetasyon değişikliklerine kadar çok geniş bir perspektifte iklim değişikliğinin ana yönlendiricilerinin ve nedenlerinin çizimsel bir bireşimini göstermektedir.

GKDB Güneş ışınımı ve GUDB yer ışınımı arasındaki ışınımsal denge, küresel ölçekte birçok iklim yönlendiricisi ('sürücüler') tarafından etkilenmektedir. Güneş akısı çıktılarındaki doğal salınımlar (Güneş döngüleri), GKDB Güneş ışınımı değerindeki ya da şiddetindeki salınımlar yoluyla Yerküre'nin enerji dengesinde değişikliklere neden olabilmektedir. Fosil yakıtların yakılması, sanayi süreçleri, arazi kullanımı değişiklikleri ve ormansızlaşma vb. insan etkinlikleri, havadaki O₃ ve aerosol tutarlarındaki değişikliklerle sonuçlanan atmosferdeki kimyasal tepkimelerle bağlantılı gaz ve aerosol salımlarını değiştirmektedir (**Türkeş, 2016; Türkeş 2017**). Atmosferdeki O₃ ve aerosol parçacıkları, GKDB Güneş ışınımını emerek, saçarak ve yansıtarak enerji dengesini değiştirmektedir. Bazı aerosol türleri, bulut yoğunlaşma (yoğuşma) çekirdeği olarak görev yaparak, bulut (su) damlacıklarının özelliklerini değiştirerek ya da bozarak olasılıkla yağış oluşumunu ve karakteristiklerini etkileyebilmektedir (Şekil 4). Bulutların KDBR ve UDBR ile olan etkileşimleri etkili ya da kuvvetli olduğu için de, bulut özelliklerindeki küçük değişiklikler bile iklim sisteminin ışınım ya da enerji bütçesi açısından önemli sonuçlar doğurabilmektedir (**Türkeş, 2016; Türkeş 2017**).

Atmosferde bulunan sera gazlarındaki (ör. CO₂, CH₄, N₂O, O₃, CFC'ler) antropojen değişiklikler ve iri aerosoller (> 2.5 µm), GUDB yer ışınımını soğurarak ve daha düşük hava sıcaklığında daha az enerjiyi yeneden salarak GUDB ışınımının tutarını ya da şiddetini değiştirir. Yerküre yüzeyinin albedosu ise, arazi (kara) örtüsü ve vejetasyon, kar ya da buz örtüsü ve okyanus renginde oluşan değişiklikler ve bozulmalar nedeniyle değişebilir. Tüm bu değişiklikler, doğal mevsimsel ve günlük değişiklikler (ör. kar örtüsü) ile insan etkisi ve etkinlikleri (ör. arazi kullanımı değişiklikleri, vejetasyon formasyonlarının ya da tiplerinin değiştirilmesi, vb.) tarafından yönlendirilir ve/ya da denetlenir (**Türkeş, 2016; Türkeş 2017**).

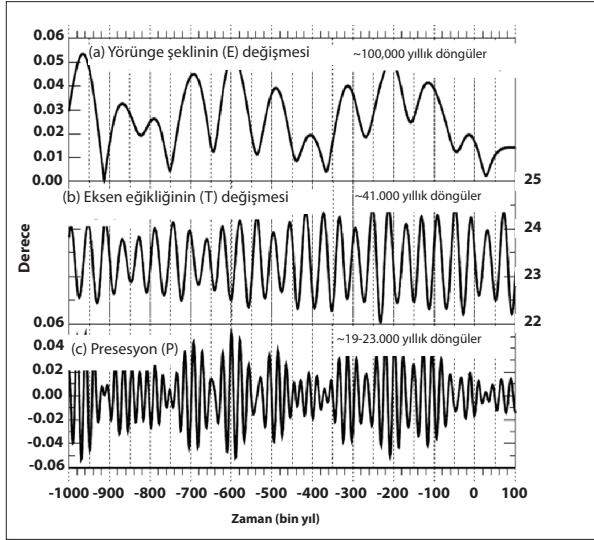
3.2 İklim değişikliğinin doğal nedenleri

Bugünkü bilgilerimize göre, küresel iklim, Yerküre'nin 4.6 milyar yıllık jeolojik tarihinin başlangıcından beri tüm alan ve zaman ölçeklerinde değişme eğiliminde **olmuştur** (**Erlat, 2010; Türkeş, 2013a**). İklim milyonlarca yıl boyunca yıllık ortalama yüzey sıcaklıklarının kutup (polar) bölgelerinde 10 °C'nin

üzerindeki hava sıcaklıklarıyla nitelenen çok sıcak koşullardan, inlandsis'lerin (buzul kalkanlarının ya da kıta buzullarının) orta enlem karalarının çoğunluğunu kapladığı buzul devirlerinde ya da çağlarındaki iklimleri arasında salınım göstermiştir (bkz. Şekil 4). Bazı varsayımlara göre, geçmişteki bazı soğuk dönemlerde Yerküre'nin tüm yüzeyi buzla kaplanmıştır (Kartopu Yerküre Hipotezi). Paleozoik'ten (Birinci Zaman) günümüze yaklaşık 545 milyon yıl uzunluğundaki zaman dizisi izgesinin, günümüze yakın bölümünde daha düşük genlikli dalgalanmaların, içinde bulunduğumuz yaklaşık son 10,000 yıllık Holosen dönemindeyse neredeyse bir yılın kendinden önceki yıla göre tam olarak aynı olduğu bir yılın gözlenmediği yıllararası, onlarca ya da daha uzun yıllık zaman ölçeklerinde geliştiği görülür (**Erlat, 2010; IPCC, 2013; Türkeş, 2010; Türkeş, 2013a; Türkeş, 2013b; Türkeş, 2016**).

Kendi evrimiyle bağlantılı olarak, ortalama Güneş-Yerküre uzaklığında Güneş'in fotosfer katmanından tüm dalga boylarında yaydığı ve atmosferin üst sınırında Güneş ışınlarına dik bir birim alana birim zamanda ulaşan toplam radyant enerji (toplam Güneş irradyansı ya da Güneş sabiti, W/m²), Yerküre'nin 4.6 milyar yıllık tarihi boyunca yaklaşık %30 kadar artmıştır. Toplam Güneş irradyansında daha kısa zaman ölçeklerinde gerçekleşen değişimlerse, genellikle benzer bir genliğe sahip olmaktadır. Yerküre'nin orbital karakteristiklerinde oluşan düşük sıklıklı değişimler, Yerküre yüzeyindeki her nokta üzerinde belirli bir mevsimde alınan Güneş enerjisi tutarını değiştirir. Bu kapsamda oluşan en önemli dalgalanmalar, 10,000 – 100,000 yıl aralığında gözlenir. Tek volkan püskürmeleri, püskürmeyi izleyen ilk yıllarda genel bir soğumaya yol açar (**Erlat ve Türkeş, 2015; Erlat ve Türkeş, 2019**). Ayrıca, volkanik etkinlikler, belirli bir on yıllık ya da yüz yıllık dönemde yoğunlaşırsa, düşük sıklıklı bir zorlamadan da sorumlu olabilir (Şekil 4). Daha uzun zaman ölçeklerinde, örneğin, özellikle levha tektoniğine bağlı olarak bir okyanusal levha ile bir kıtasal levhanın ve/ya da iki okyanusal levhanın birbirine yaklaşması ve çarpışması sonucunda oluşan sırasıyla büyük ölçekli dağ oluşum alanları (ör. Güney Amerika'da And Dağları) ve ada yayları (ör. Büyük Okyanus'takiler) ile bağlantılı artan volkanik etkinlikler, binlerce yıldan milyonlarca yıla kadar uzun dönemler boyunca sürebilen kuvvetli bir soğuma eğiliminin oluşmasına neden olabilir (**Türkeş, 2010**).

Bu kapsamda, El Niño – Güney Salınımı (ENSO), Kuzey Atlantik Salınımı (NAO) ya da Arktik Salınım (AO) gibi atmosferik salınımlar ya da uzakbağlantı desenleri,



Şekil 5. Olasılıkla son bir milyon yılda ve gelecek 100 bin yılda (Yıl 0, Milattan Sonra 1950'ye karşılık gelir), Yerküre'nin eksantrite (E), eksen eğikliği (T, derece cinsinden) ve iklimsel presesyon (P) hareketindeki değişimler (Berger 1978'e göre Goosse ve ark. 2010'ndan yeniden düzenlendi). İklimsel presesyonun en düşük değeri, günberi zamanında boreal (KYK kutupsal) kış (Aralık) gündönümüne karşılık gelir

küresel iklim sisteminin atmosfer kökenli içsel zorlamalarına verilebilecek önemli örneklerdir (Türkeş, 2016; Türkeş, 2017; Türkeş ve Erat, 2019). İkinci olarak, okyanusların ve inlandsis'lerin büyük ataleti nedeniyle, yüksek sıklıklı değişimler bastırılırken, herhangi bir perturbasyonun (sarsımın) baskın etkisi, zorlamanın uzun zaman ölçeklerindeki birleşmesi ya da bütünleşmesi ile bağlantılı olabilir. Atalet, bir sarsıma verilecek yanıtın gecikmesine de yol açabilir. Ayrıca, sistemin yanıtı (tepkisi), zorlamanın karakteristikleri ile zorlamanın kendisinin neden olduğu iklim değişiklikleri arasında büyük farklılıkların doğmasına yol açan karmaşık düzenekleri kapsayabilir. Örneğin, eğer bir zorlama –bir çeşit rezonansı yönlendirerek- sistemin içsel değişkenliğinin bir modunu belirli bir frekansta harekete geçirir ya da tetikleirse, zorlama o frekansta belirgin şekilde kuvvetli olmamasına karşın, o frekanstaki tepkinin büyüklüğü daha fazla olacaktır. Öte yandan, eğer bir eşik (değer) – sistemin neredeyse kendiliğinden ve olasılıkla oldukça farklı bir durumdan başka bir duruma evrilmesi sonucunda- aşılsa, zorlamadaki küçük değişiklikler iklim sisteminde büyük değişimlerin ortaya çıkmasına yol açabilir. Derin okyanus dolaşımını içeren böyle bir geçiş, son buzul çağında Grönland buz kalkanında kaydedilen –ve buz karotlarının çözümlenmesiyle elde edilen- ani iklim değişikliklerinin bazılarını açıklamak için önerilebilir (Türkeş, 2010; Türkeş 2013a; Türkeş, 2016).

3.2.1 Milankovitch döngüleri

"Atmosferin tepesinde (ya da atmosferin etkisini gözardı ettiğimizde yeryüzünde) 1 m² genişliğindeki yatay bir düzlemde birim zamanda (s) alınan anlık Güneş enerjisi (W/m²)" şeklinde tanımlanan insolasyon, Güneş-Yerküre arasındaki uzaklığın ve Güneş'in zenith uzaklığının kosinüsünün bir fonksiyonudur. Bu iki değişken, günün zamanı, enlem ve Yerküre yörüngesinin karakteristiklerinden yararlanarak hesaplanabilir. Klimatolojide, Yerküre ile Güneş arasındaki astronomik ilişkiler Milankovitch Döngüleri olarak adlandırılır (Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016). Astronomik ilişkiler, özellikle Yerküre'nin eksen eğikliği (tilt, T), Yerküre'nin Güneş'in çevresindeki yörüngesinin şekli ya da eksantrite (E) ve presesyon (P) olarak bilinen üç orbital parametre tarafından belirlenir (Şekil 5). Kısaca, eğiklik (T), "ekliptik düzleminin ekvator düzlemine göre olan eğikliğinin bir ölçüsü" (daha eğik ya da daha dik) ve eksantrite (E), "Yerküre'nin Güneş'in çevresindeki yörünge şeklinin bir ölçüsü" [ör. daha fazla eliptik (yuvarlaklık az) ya da daha az eliptik (daha yuvarlak)] olarak tanımlanır. İklimsel presesyon (P) ise, yaz gündönümünde (solstis) Güneş-Yerküre uzaklığındaki daha açık bir söyleyişle, 'günberi zamanındaki' değişikliklerle bağlantılıdır. Bu yüzden, küresel iklimin değişmesine neden olabilecek başlıca astronomik ilişkiler, Yerküre'nin Güneş'in çevresindeki yörüngesinin şeklindeki (orbital zorlama), eksen eğikliğindeki ve presesyonundaki (günberi zamanındaki) değişiklikleri içerir (Türkeş, 2013a) (Şekil 5 ve 6).

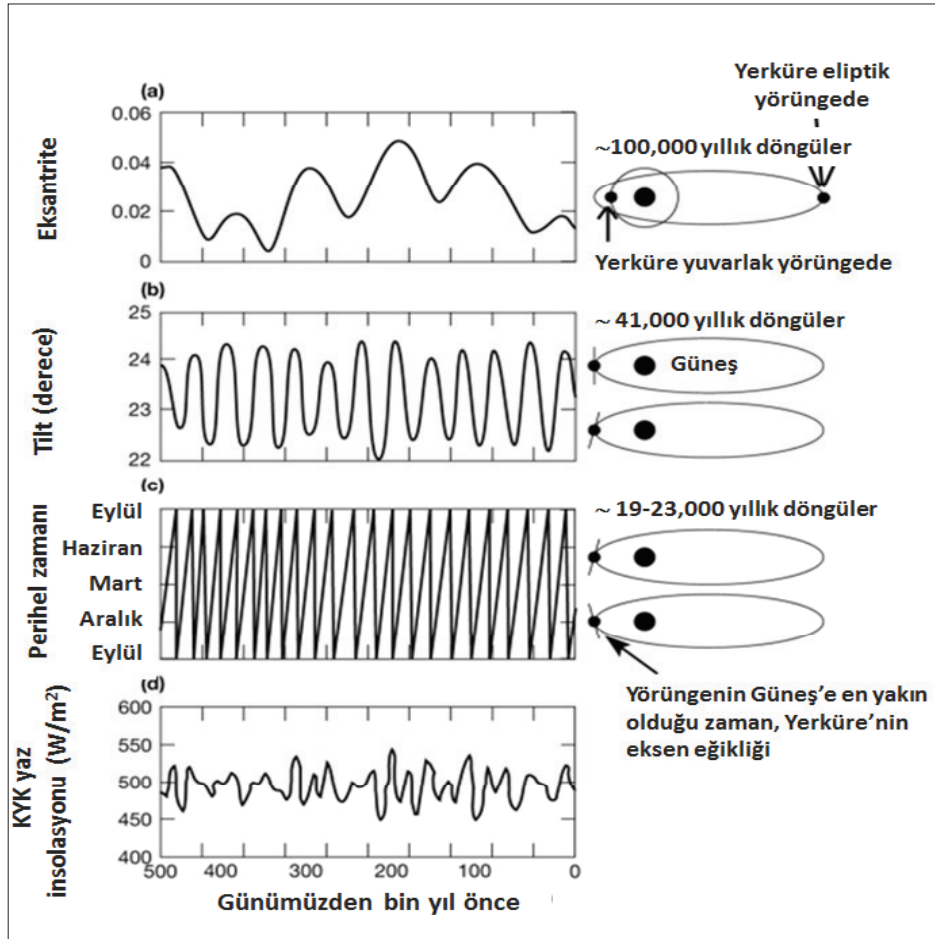
Yerküre'nin yörünge biçimindeki değişiklikler, başka bir deyişle orbital zorlama, Yerküre - Güneş arasındaki uzaklığı etkiler. Astronomik hesaplamalar, Yerküre'nin eksantritesindeki periyodik (dönemsel) değişimlerin, Güneş insolasyonunun mevsimsel ve enlemsel dağılımını yakından denetlediğini gösterir (Türkeş, 2013a). Insolasyonun geçmişteki ve gelecekteki olası değişiklikleri, yüksek bir güven düzeyinde milyonlarca yıl için hesaplanabilmektedir. Yerküre yörüngesinin eksantritesi, geçen birkaç milyonda neredeyse yuvarlak bir yörüngeye karşılık gelen sıfır (0) ile elipse karşılık gelen 0.054° arasında değişmiştir (Şekil 5 ve 6). Bu nedenle, Yerküre'nin aldığı yıllık ortalama enerji tutarı, Yerküre'nin yörüngesi yuvarlak olduğunda en düşüktür ve eksantrite ile birlikte artar. Ancak, eksantritedeki değişimler görece küçük olduğunda (Şekil 5 ve 6), Yerküre'nin aldığı yıllık ortalama radyasyon tutarlarında çok küçük farklılıklar ortaya çıkar. Maksimum bağıl değişim, yaklaşık 0.5 W/m²'ye karşılık gelen %15 oranına eşittir. Yerküre yörüngesinin şekil (E) değişiklikleri, ortalama 100,000 yıllık ve 400,000 yıllık daha uzun

yarı-dönemsellikler göstermektedir (Şekil 6 ve 7). Yörünge şeklindeki değişiklikler, Güneş ve Yerküre arasındaki uzaklıkta ortaya çıkan çok küçük değişiklikler nedeniyle, Güneş insolasyonu üzerinde sınırlı bir etkiye sahiptir. Ancak, bu değişiklikler, eksen eğikliğinin ve presesyonun neden olduğu mevsim etkileriyle de etkileşerek, daha karmaşık birleşik bir etki ortaya çıkar (Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016). Bugünkü bilgilerimize göre, yaklaşık 400,000 yıl önce olduğu ve olasılıkla gelecek 100,000 yıl süresince olabileceği gibi, küçük yörünge değişiklikleri süresince presesyonun neden olduğu mevsimlik Güneş ışınımı değişimleri, daha geniş eksenrite dönemleri boyunca olanlar kadar büyük değildir.

Yerküre'nin eksen eğikliği, Yerküre üzerinde mevsimlerin oluşumundan sorumludur. On bin yıllık zaman ölçeklerinde, Yerküre'nin eksen eğikliği arttığında, mevsimlik enerji dengesi bozulduğu ve

sıcaklık zıtlıkları kuvvetlendiği için, her iki yarımkürede de kışlar daha soğuk ve yazlar daha sıcak olur. Başka bir deyişle, insolasyon yaz mevsiminde polar bölgelerde daha yüksek olurken, kışın uzun polar gece süresince sıfır olur. Yerküre'nin eksen eğikliği azaldığındaysa, mevsimler daha az şiddetli geçer; yazlar daha serin, kışlar daha ılıman olur (Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016).

Daha serin yaz mevsimlerinin, yüksek enlemlerde (kutup ve kutupaltı bölgelerde) kar ve buz örtüsünün daha az erimesine ve yerde daha fazla kalmasına neden olarak, kutup bölgelerinde kütleli buzul kalkanlarının oluşmasına yol açmış olabilir (Türkeş, 2013a). Ayrıca, yine uzun zaman ölçeklerinde olmak koşuluyla, daha fazla kar ve buz/buzullar ile kaplanan Yerküre, GKDB Güneş ışınımını uzaya daha fazla yansıtarak ek soğumaya neden olduğu için, iklim sisteminde (bu örnekteki etkisi negatif olan) bir buz-albedo geribeslemesi düzeneği oluşturur (Türkeş, 2013a, Türkeş, 2016).



Şekil 6. Olasılıkla son bir milyon yılda ve gelecek 100 bin yılda (Yıl 0, Milattan Sonra 1950'ye karşılık gelir), Yerküre'nin eksenrite (E), eksen eğikliği (T, derece cinsinden) ve iklimsel presesyon (P) hareketindeki değişimler (Berger 1978'e göre Goosse ve ark. 2010'ndan yeniden düzenlendi).

Son birkaç milyon yılda, Yerküre'nin eksen eğikliği, ortalama olarak yaklaşık 41,000 yıllık yarı-dönemsellikle birlikte yaklaşık 22.5° ve 24.5° arasında değişim göstermiştir (Şekil 5 ve 6). Bu değişimin enerji karşılığı, günlük ortalama insolasyon tutarında kutuplarda 50 W/m²'ye ulaşan önemli değişikliklerdir. Eksen eğikliğinin değeri, yıllık ortalama insolasyon üzerinde de, yüksek enlemlerde birkaç W/m²'lik artışa neden olurken, Ekvator'da büyüklük olarak daha küçük bir azalma şeklinde beliren bir etki yapmaktadır. Sonuç olarak, eksen eğikliğindeki değişimler mevsimlik zıtlıkları düzenlemekle birlikte, yıllık ortalama GKDB Güneş ışınımı değişimleri alçak enlemlerde yüksek enlemlere göre bir zıt etki yaptığı için, küresel ortalama insolasyon üzerinde önemli bir etki oluşmaz (Türkeş, 2013a).

Son olarak, mevsimlerin zamansal olarak perihel (günberi) noktasına göre konumu olarak tanımlanabilecek olan Yerküre'nin 'iklimsel presesyon' hareketinin, insolasyon ve iklim değişikliği üzerindeki etkisinin önemli olduğunu söylemek gerekir. Eğer Yerküre uzun kutup yazında Güneş'e daha yakın ve uzun kutup kışında daha uzak olursa, Kuzey Yarımküre'de (KYK) yaz mevsimi daha sıcak, kış mevsimiye daha soğuk olacak ve mevsimler arası enerji ve sıcaklık zıtlığı daha da artacaktır (Türkeş, 2010; Türkeş, 2016). Öte yandan, Yerküre Güneş'e uzun kutup kışında daha yakın olursa, kış mevsimi daha sıcak olacağından, bu kez KYK'deki mevsimlik zıtlık daha küçük olacaktır. Bu etki, özellikle eksantrite daha büyük (yörünge daha eliptik) olduğunda belirgindir. Eğer eksantrite sifıra çok yakın (yörünge yuvarlak) olursa, Güneş ve Yerküre arasındaki uzaklık hemen hemen sabittir ve mevsimlerin perihel (günberi) noktasına göre konumlarındaki (mevsimlerin zamansal yerlerindeki) değişiklikler üzerinde herhangi bir etkiye yol açmaz (Türkeş, 2013a). İklimsel presesyonun değeri, yaklaşık olarak -0.05 ve 0.05° arasında değişir (Şekil 5 ve 6). Bu değişiklikler, hemen tüm enlemlerde 20 W/m²'den daha büyük değişikliklere yol açar. Bu yüzden, iklimsel presesyon alçak ve orta enlemlerdeki Güneş insolasyonu değişimleri üzerinde daha etkilidir.

Sonuç olarak, presesyon, Yerküre'nin, yaklaşık 19,000 ve 23,000 yıllık yarı-periyodik bir döngüsellikle birlikte, Güneş'e en yakın olma konumunun (perihel) gerçekleşme zamanındaki yarı-döngüsel değişimlere ya da salınımlara karşılık gelir. Yörünge üzerinde mevsimlerin süresi ve konumundaki değişimler, Güneş insolasyonunun enlemsel ve mevsimsel dağılımını düzenler (Türkeş, 2013a). Güneş insolasyonundaki mevsimlik değişimler yıllık ortalama

değişimlerin genliğinden daha büyüktür ve değeri 60 W/m²'ye ulaşabilir. Yerküre'nin 'iklimsel presesyon' hareketi nedeniyle, Yerküre 11,000 yıl önceki boreal (KYK) yazı süresince Güneş'e en yakın konumundayken, günümüzde Güneş'e en yakın konumu boreal kışa karşılık gelmektedir (Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016).

4. Doğal sera etkisi

4.1. Doğal sera gazları ve sera etkisi

Yeryüzündeki tüm yaşam biçimleri için vazgeçilmez bir ortam olan atmosfer, temel olarak birçok gazın karışımından oluşur. Atmosferdeki başlıca gazlar durumundaki azot (%78.08) ve oksijen (%20.95), temiz ve kuru hava hacminin %99'unu oluşturur. Kalan yaklaşık %1'lik kuru hava bölümü, etkisiz bir gaz olan argon (%0.93) ile nicelikleri çok küçük olan bazı eser gazlardan oluşur. Atmosferdeki birikimi çok küçük olmakla birlikte, önemli bir sera gazı olan CO₂, %0.038 oranı ile dördüncü sırada yer alır. Doğal sera gazlarının en önemlileri, başta en büyük katkıyı sağlayan su buharı H₂O ve CO₂ olmak üzere, CH₄, N₂O ve O₃ gazlarıdır (Türkeş, 2010; Türker, 2017).

İklim sistemi için önemli olan doğal etmenlerin başında sera etkisi gelir. Bulutsuz ve açık bir havada, kısa dalga boylu Güneş ışınımının önemli bir bölümü atmosferi geçerek yeryüzüne ulaşır ve orada emilir (Şekil 7). Ancak, Yerküre'nin yüzeyinden salınan kızıl ötesi ışınımının bir bölümü, uzaya kaçmadan önce çoğunluğu alt atmosferde (troposfer) bulunan ışımsal olarak etkin sera gazlarıncı emilir ve sonra tekrar salınır. Enerji akılarının nicelikleri dikkate alındığında, gelen Güneş ışınımının (342 Wm⁻²) yaklaşık %31'i (107 Wm⁻²) yüzeyden, atmosferdeki aerosol'lerden ve bulut tepelerinden yansıtılarak uzaya geri döndüğü görülür (Şekil 7). Bu yüzden, Yerküre'nin ortalama albedosu yaklaşık %31 ve sisteme giren Güneş ışınımı net olarak %69'dur (235 Wm⁻²). Gelen net Güneş ışınımının, yaklaşık üçte ikisi (168 Wm⁻²) yüzey ve üçte biri (67 Wm⁻²) atmosferce emilir. Güneş enerjisinin Yer-atmosfer birleşik sisteminde tutulan bu %69'luk bölümü, iklim sistemini oluşturan ana bileşenlerce (atmosfer, hidrosfer, litosfer ve biyosfer) emilir ve onların ısınmasını sağlar (Türkeş, 2010; Türker, 2017). Sonuç olarak, Güneş ışınımının net girdisi (235 Wm⁻²), kızılötesi yer ışınımının net çıktısı (235 Wm⁻²) ile dengelenir (Şekil 7).

4.2 Enerji dengesi ve doğal sera etkisi

Sera etkisi, Yerküre'nin salım sıcaklığını tanımlamada kullanılan enerji dengesinin çok yalın bir açıklamasıyla gösterilebilir (Türkeş, 2010). Uzun dalga

boylu yer ışınımı açısından bir siyah cisim, buna karşın kısa dalga boylu Güneş ışınımına karşı geçirgen olduğu kabul edilen atmosfer, küresel enerji dengesinin kurulmasında anahtar rol oynar (Şekil 7). Güneş ışınımı çoğunlukla görünür ve kızıl ötesi yakınındaki dalga boylarında olduğu, buna karşın yeryüzü temel olarak uzun dalga boylu kızılötesi ışınım (ısı enerjisi) saldığı için, atmosfer Güneş ve yer ışınımını çok farklı olarak etkileyebilir. Atmosfer katmanı, altındaki yüzeyin saldığı enerjinin tümünü etkili bir biçimde emdiği ve bir siyah cisim gibi saldığı için, uzaya salınan tek radyasyon bu modelde atmosferden olandır (Şekil 8). Bu yüzden, atmosferin tepesindeki enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir (Denk. 1).

$$\frac{S}{4}(1 - \alpha_p) = \sigma \cdot T_A^4 = \sigma \cdot T_e^4 \quad (1)$$

Bu nedenle, enerji dengesine ulaşmak için, denge durumundaki atmosferin sıcaklığının salım sıcaklığı

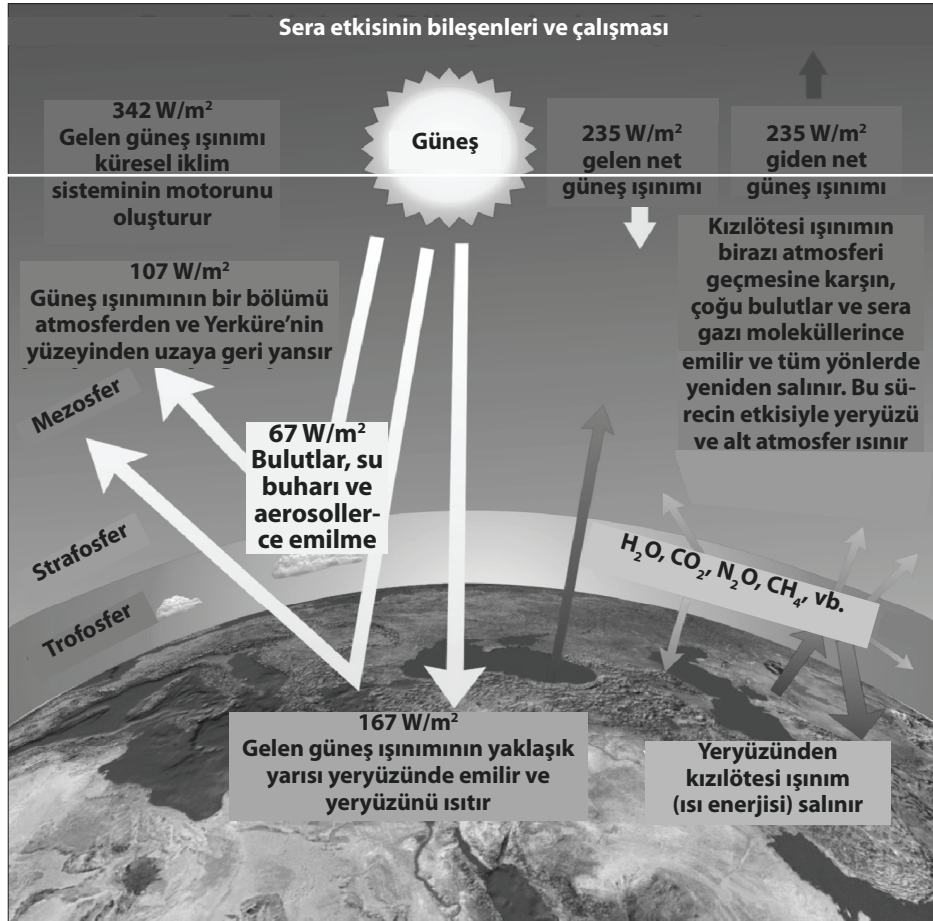
olması gerektiğini görüyoruz. Ancak, enerji dengesini atmosfer ve yüzey için elde ederek görebildiğimiz gibi, yüzey sıcaklığı daha yüksektir. Atmosferin enerji dengesi aşağıdaki şekilde verilir (Denk. 2):

$$\sigma \cdot T_s^4 = 2\sigma \cdot T_A^4 \Rightarrow \sigma \cdot T_s^4 = 2\sigma \cdot T_e^4 \quad (2)$$

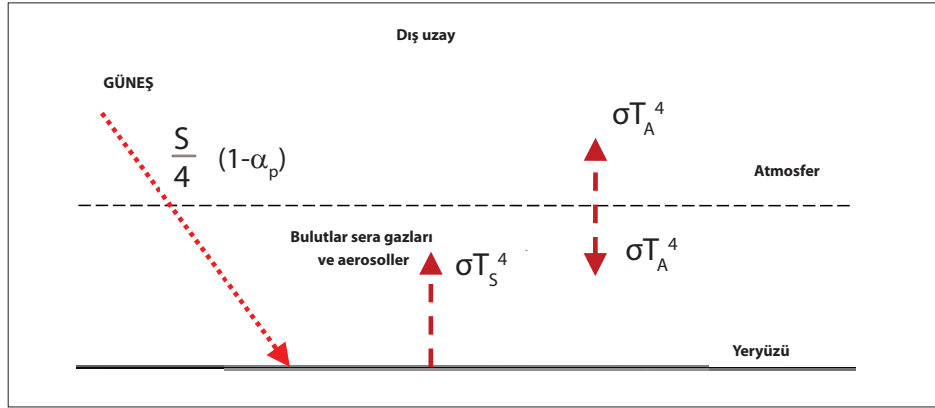
Yüzey enerji dengesi ise, aşağıdaki yaklaşımlarla açıklanır (Denk. 3):

$$\frac{S}{4}(1 - \alpha_p) + \sigma \cdot T_A^4 = \sigma \cdot T_s^4 \Rightarrow \sigma \cdot T_s^4 = 2\sigma \cdot T_e^4 \quad (3)$$

Yüzey enerji dengesine (Denk. 3) ek olarak Şekil 7 ve 8'den açıkça gördüğümüz gibi, atmosfer, gelen Güneş enerjisi akısının yüzeye ulaşmasına engel olmamasına karşın, kendi uzun dalga boylu ışınımını yeniden aşağıya doğru salarak, yüzeyin Güneş ısınmasını arttırdığı için ki, bu kez Güneş ısıtmasına eşittir, yüzey sıcaklığı artar.



Şekil 7. Sera etkisinin çizimsel gösterimi (Türkeş, 2010). Yerküre'nin sıcaklık dengesinin kuruluşundaki en önemli süreç olan doğal sera etkisi, temel olarak, atmosferin yüksek enerjili kısa dalga boylu Güneş ışınımını geçirme, buna karşılık düşük enerjili uzun dalga boylu yer ışınımını tutma eğiliminde olması nedeniyle oluşur.



Şekil 8. Yer ışınlamına karşı kısmen ve zayıf geçirgen, Güneş ışınlamına karşıysa kuvvetli geçirgen olan Yerküre atmosferindeki enerji akılarının temel eşitlikleriyle birlikte gösterimi. Kuramsal olarak, gelen kısa dalga boylu net Güneş enerjisi $[(S/4) \times (1-\alpha_p)]$ önce yeryüzünde emilir; sonra yeryüzünden uzun dalga boylu kızılötesi ışınlam (ısı enerjisi) olarak (σT_s^4) atmosfere salınır. Yeryüzünden salınan kızılötesi ışınlam, atmosferdeki bulutlar, su buharı, karbondioksit, diazotmonoksit, metan ve ozon gibi sera gazları emilir ve atmosfer tarafından yeniden hem aşağıya hem de dış uzaya doğru uzun dalga boylu kızılötesi ışınlam (σT_A^4) olarak salınır [Çeşitli kaynaklara ve Hartmann (1994)'a göre Türkeş (2010a)'ten].

Sonuç olarak, atmosferin sera etkisi, atmosfer gelen kısa dalga boylu Güneş ışınlamına karşı görece geçirgen olduğu, buna karşın uzun dalga boylu yer ışınlamını etkili bir biçimde emdiği ve yeniden saldığı için yüzeyi ısıtır. "Atmosferdeki gazların gelen Güneş ışınlamına karşı geçirgen, buna karşılık geri salınan uzun dalga boylu yer ışınlamına karşı çok daha az geçirgen olması nedeniyle, Yerküre'nin beklenenden daha fazla ısınmasını sağlayan ve ısı dengesini düzenleyen doğal süreç" sera etkisi olarak adlandırılır (Türkeş, 2003a; Türkeş, 2017). Yeryüzünün ortalama hava sıcaklığı, sera etkisi sayesinde, bu sürecin bulunmadığı ortam koşullarına göre yaklaşık 33°C daha yüksektir. Başka bir deyişle, yukarıdaki fizik yasalarına dayanarak, Yerküre'nin -18 °C olması gereken salım sıcaklığının, doğal sera etkisi nedeniyle +15 °C olduğunu belirleyebiliriz.

4.3 Küresel iklimin kısa tarihçesi

Küresel iklim, atmosfer (havaküre), hidrosfer (suküre), buz küre, litosfer (taşküre) ve biyosfer (yaşamküre) olarak adlandırılan başlıca beş bileşeni bulunan ve bu bileşenler arasındaki karşılıklı etkileşimleri de içeren çok karmaşık bir sistemdir ve kısaca iklim sistemi olarak da adlandırılır. Dış zorlamalar ve etmenler, iklim sisteminin alt sistemleri ile etkileşim içinde bulunan ve onlardan etkilenen değişiklikleri, örneğin volkanik püskürmeler, Güneş etkinliklerindeki değişimler ve Yerküre - Güneş arasındaki astronomik ilişkilerdeki değişiklikler gibi doğal olaylar ile atmosferin bileşimindeki antropojen değişiklikleri içerir. İnsan etkinlikleri sonucunda atmosfere salınan sera gazları ve aerosoller, etki süreleri değişmekle birlikte, iklim

değişikliklerine neden olabilecek başlıca dışsal zorlama ve etmenlerdir (Türkeş, 2010; Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016).

İklim değişikliğinin potansiyel 'dış' nedenleri, temel olarak Yerküre'nin katı kabuğundaki levha hareketlerini, Güneş etkinliklerindeki ve Yerküre ile Güneş arasındaki astronomik ilişkilerdeki değişiklikleri içerir. Başka bir deyişle, dış zorlama ve etmenlerin neden olduğu değişiklikler, iklim sisteminin dışındaki doğal olaylar ile antropojen zorlama ve etmenlerin denetiminde ve etkisiyle gelişir. Astronomik ilişkiler, Milankovitch döngüleri olarak da adlandırılan bir dizi dönemsel değişiklikleri içermekte ve uzun dönemli iklim değişikliklerinin açıklanması açısından önemli kanıtlar sunabilmektedir (Türkeş, 2010; Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016).

Yerküre'nin ilk 1 milyar yıllık tarihi süresince egemen olan iklimini araştırmak için, dolaylı kayıtlara ve öngörülere dayanmak zorunda olduğumuzu kabul etmek zorundayız. Örneğin, jeomorfolojik (yeryüzü şekilleri, oluşum ve evriminin bilimi) olarak, en azından bölgesel ölçekte, belirli bir jeolojik dönemdeki glasiyel sedimentlerin (buzul çökeltileri) varlığı glasiyasyonu (buzullaşmayı) gösterirken, kaya tuzu ve jips ya da anhidrit gibi evaporit çökelti kayaçlarının varlığı buharlaşmanın etkili olduğu kurak ve sıcak bir dönemin ve o dönemdeki sığ bir denizin ya da tuzlu/sodali bir gölün kanıtlarını oluşturabilir. Geçmiş iklimlerin ve o iklimlerdeki değişikliklerin ek göstergelerini sağlayabilecek olan çeşitli mineral ve kayaç çeşitlerinin oluşması içinse, özel klimatolojik, hidrolojik, jeolojik

ve jeomorfolojik koşulların bir araya gelmesine gerek vardır (**Türkeş, 2010; Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016**). Ancak, henüz bu konuda pek çok önemli belirsizlik vardır. En iyi çözünürlüklü (yüksek ayrıntılı) iklim rekonstrüksiyonları bile, yeni bilgi ve teknikler ortaya çıktığında düzenli olarak değiştirilmektedir. Yerküre'nin ilk zamanlarındaki iklimine ilişkin kanıtlar ise özellikle çok azdır. Konuya ilişkin bilimsel araştırmalar, Yerküre'nin 4.6 milyar yıl önce ilk oluştuğu zaman, gelen toplam Güneş ışınımının bugünkünden yaklaşık %30 oranında daha az olduğunu ortaya koymaktadır. Eğer, albedo (cisimlerin gelen kısa dalga boylu Güneş ışınımını yansıtma oranı), atmosferin bileşimi, Yerküre ve Güneş arasındaki uzaklık gibi koşulların o zaman da şimdiki ile aynı olduğu kabul edilirse, Yerküre'nin temel enerji dengesi modellerinden (ör. gezegensel enerji dengesi ve salım sıcaklığı eşitlikleri) yararlanarak yapılacak bir hesaplama sonucunda, ortalama yüzey sıcaklığının bugünkünden 30 °C daha soğuk olması gerektiği gösterilebilir (**Türkeş, 2010; Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016**).

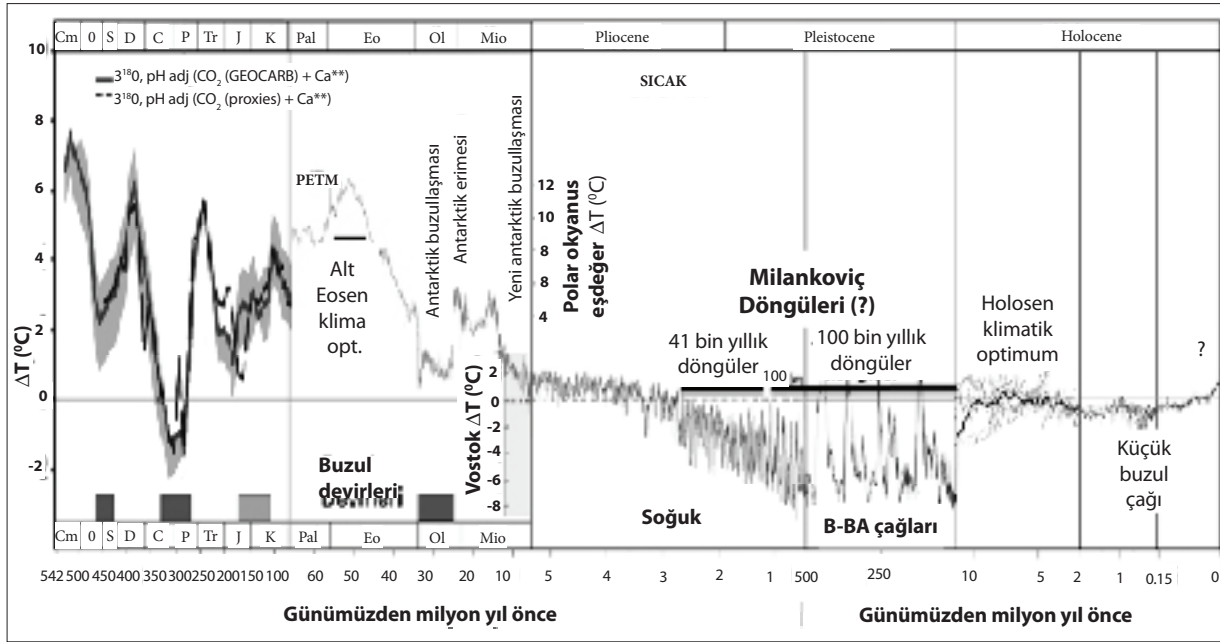
Yerküre iklim tarihinin 700-800 milyon yıl uzunluğundaki ilk bölümünde, küçük gezegenimsilerin ve meteoritlerin sürekli bombardımanı da küresel iklimi bir ölçüde ısıtmış olmasına karşın; kuramsal olarak sözü edilen koşullarda, Yerküre'nin iklim tarihinin büyük bölümünde çok soğuk ve donmuş olması beklenirdi. Ancak bu varsayım, en azından 4 milyar yıl önceki sıvı bir okyanusun varlığına ilişkin jeolojik kanıtlarla ters düşer. Bu belirgin zıtlık, '*faint early Sun paradox*' (Türkçe'ye '*solgun erken Güneş paradoksu*') şeklinde çevrilebilir) olarak adlandırılır. Bu paradoksun ana nedeni, olasılıkla Yerküre'nin erken zamanlarında gerçekleşmiş olan daha kuvvetli bir sera etkisinin varlığı olabilir. O zamanki atmosfer, çok daha yüksek CO₂ birikimi nedeniyle, bugünün atmosferinden çok farklıydı. O zamanki atmosferde CO₂ birikiminin günümüz değerine göre yaklaşık 100 kat daha yüksek olduğu ve hemen hiç oksijen (O₂) molekülü bulunmadığı öngörülür. Atmosferde oksijen yokluğu durumundaysa, CO₂ gibi ışınımsal olarak etkin bir gaz (sera gazı) olan CH₄, günümüz atmosferinde olduğu kadar hızla oksitlenmiyordu ve atmosferdeki birikimleri günümüzden çok daha yüksek düzeydeydi (**Türkeş, 2010; Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016**).

Yerküre'nin Birinci Zamanın (Paleozoyik) başından, başka bir deyişle, Kambrien Devrinden günümüze kadar geçen 545 milyon yıllık jeolojik ve iklimsel geçmişindeki çeşitli zaman ölçeklerinde gerçekleşen iklim değişiklikleri, Şekil 4'de birleştirilmiş sıcaklık zaman dizileriyle gösterildi. Şekil 9'da zaman olarak, günümüz 0 ile gösterilirken; değişimleri ve sapmaları daha

iyi izleyebilmek ve karşılaştırabilmek amacıyla, günümüz iklimi de 0 ile gösterilmiştir. Öte yandan, zaman dizisi çiziminde gerçek bir logaritmik ölçek yerine, her biri günümüze doğru daha ayrıntılı doğrusal bir ölçekle gösterilerek, ancak çok yaklaşık bir logaritmik ölçek kullanılmıştır (**Türkeş, 2010; Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016**).

Geçen 65 milyon yıl süresince, atmosferdeki CO₂ birikimleri yavaş yavaş Paleosen devrindeki ve alt (erken) Eosen'deki 1000 ppmv düzeyinden, Pleystosen devresinde 300 ppmv'nin altına inmiştir. Yaklaşık 2.588 milyon yıl uzunluğundaki Kuvaterner devrinin, günümüze yakın 0.0117 milyon ya da yaklaşık 11,000 yıl uzunluğundaki Holosen devresi dışında kalan çok büyük bölümü, Pleystosen devresine karşılık gelir. Beklendiği gibi, bu uzun süreli ve yavaş gelişen azalma, özellikle Paleosen ve Eosen devirlerindeki levha hareketleri ve dağ oluşumları (orojenez) nedeniyle artmış olan volkanik gaz ve kül salımlarıyla – ki, volkanik püskürmeler o zamandan beri giderek azalmıştır- ve silikat kayaların ayrışma oranındaki değişikliklerle kısmen bağlantılıdır. Bugünkü bilgilerimize göre, CO₂ birikimindeki azalma, günümüzden önce 52 ve 50 milyon yılları arasında oluşan *Erken Eosen Klimatik Optimumu*' devresindeki sıcak koşullardan sonraki soğumayla bağlantılı olmalıdır (Şekil 9). İklimdeki bu önemli kayma, çoğunlukla, bir kuvvetli sera etkisi ikliminden kıtasal örtü buzullarının günümüze göre Antarktika'da yaklaşık 35 milyon yıllarında ve Grönland'da yaklaşık 3 milyon önceden başlayarak var olduğu (ara dönemlerdeki görece daha soğuk ya da daha sıcak dönemlerle birlikte) "*sıcak bir küresel iklimden soğuk bir küresel iklim* ya da bir '*buzevine*' geçiş" olarak kabul edilir (Şekil 9). Bu devirdeki iklim rekonstrüksiyonları çoğunlukla foraminifera (bazı yeni çalışmalarda, 'foraminiferida') olarak adlandırılan planktonik (pelajik) ve bentik yaşayışlı küçük deniz organizmalarının kavrıklarının (CaCO₃ bileşimli kabukların) oksijen izotop bileşimindeki değişimlere dayanır (**Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016**).

Buzul çağlarının Milankovitch ya da orbital kuramına göre, Kuvaterner devrinin Pleystosen devresindeki buzul çağları genel olarak Kuzey Yarım Küre'deki (KYK) yüksek enlem yaz insolasyonundaki azalmayla tetiklenir. Bunun sonucunda, kış mevsimindeki kar yağışı yıl boyunca daha uzun bir süre etkili olur ve KYK'de kıtasal örtü buzullarını (buzul kalkanlarını) ve Alpin dağ (takke ve vadi) buzullarını oluşturmak üzere birikir. Benzer biçimde, Yerküre'nin yörünge değişikliklerince (orbital zorlama) belirlenen özellikle KYK'deki kuvvetli



Şekil 9. Yerküre'nin Kambriyen devrinden günümüze (Holosen) geçen yaklaşık 545 milyon yıllık dönemdeki jeolojik geçmişinde çeşitli zaman ölçeklerinde gerçekleşen iklim değişikliklerinin birleştirilmiş çeşitli sıcaklık zaman dizileriyle gösterimi. Robert A. Rohde tarafından Global Warming Art için hazırlanan orijinal çizimden yararlanarak yeniden düzenlendi (www.globalwarmingart.com/wiki/File:65Myr_Climate_Change_Rev_png, erişim: Haziran 2013).

yüksek enlem yaz insolasyonu dönemlerinin, hızlı deglasyasyonu (buzulların erimesi ve çekilmesi), onunla bağlantılı iklim değişikliklerini ve deniz düzeyi yükselmesini tetiklediği kabul edilir. Bu orbital zorlamalar, iklim değişikliğinin gidişini belirlerken, büyük yanıtların orbital zorlamaları güçlendiren kuvvetli geri beslemeler tarafından belirlendiği görülür (Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016).

Antarktika buzulundan alınan buz örnekleri (karot) içinde hapsolmuş havanın kimyasal çözümlenmeleri, atmosferdeki CH₄, CO₂ ve N₂O birikimlerinin Pleyistosen devresinin son 650 bin yıllık döneminde (yaklaşık Orta ve Geç Pleyistosen dönemlerine karşılık gelir) yerel sıcaklık koşulları için iyi bir dolaylı kayıt ve gösterge olan döteryum (δD) değişimleriyle ve buna bağlı olarak da buzul ve buzularası çağlarla uyum içinde olabildiğini göstermiştir (Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016). Bentik oksijen 18 izotopu (δ18O) ise, küresel buz hacmindeki değişimler için iyi bir dolaylı kayıt ve göstergedir: Yüksek bir bentik δ18O değeri, düşük bir buz hacmine karşılık gelir. Daha pozitif döteryum değerlerine karşılık gelen sıcak dönemlerin arasında ise, daha negatif döteryum değerlerinin egemen olduğu uzun ve belirgin buzul çağları yer alır. Sonuç olarak, Antarktika buz karotlarında kayıtlı bilgidan yararlanarak, Orta ve Geç Pleyistosen dönemlerinde egemen olan uzun glasiyel dönemler ('Buzul Çağları') ve görece daha kısa süreli interg-

lasiyel dönemler ('Buzularası Çağlar') arasındaki ardalama belgelenmiştir (Türkeş, 2013a; Türkeş, 2016).

Günümüz insanı, jeolojik zaman ölçeğine göre Pleyistosen devresinde oluşan buzularası çağların sonuncusu olan Holosen'de yaşamaktadır. Pleyistosen buzullaşmasının en iyi bilineni, en şiddetli zamanı yaklaşık 20-22 bin yıl önce oluşan ve 'Würm Maksimumu' ya da 'Son Glasiyel Maksimum' (Son Buzul Çağı Maksimumu, LGM) olarak adlandırılan en sonuncusudur. Son buzul çağında, buzul kalkanları yüksek enlemlerdeki anakaraların çoğunluğunu kaplamış ve Kuzey Amerika, Avrupa ve Asya'nın (Şekil 10) topografik olarak elverişli olduğu bölgelerinde yaklaşık 40° enlemine kadar güneye yayılmıştır.

Aynı dönemde dağlık alanlarda [ör. Alpler'de, Türkiye'de (Şekil 11) Doğu Karadeniz ve Toroslar gibi yüksek sıra dağların ve Uludağ, Erciyes, Ağrı, Süphan, Cilo, vb. yüksek tek dağların doruklarında] Alpin vadi buzulları ve takke buzulları da, alansal ve hacimsel olarak büyümüş, dağın ve kalıcı kar sınırının yükseltisine uygun olarak bugünkünden yüzlerce metre aşağılara kadar inmiştir (ör. Akçar ve Schlüchter, 2005; Bayraktar ve Özdemir, 2010; Bayraktar ve ark., 2015; Çiner, 2004; Doğu ve ark., 1993; Erinç, 1952, 1953, 1978; Erlat, 2010; Erol, 1981; İzbırak, 1951; Kurter, 1991; Sarıkaya ve ark., 2011; Turoğlu, 2011; Türkeş, 2016; vb.).

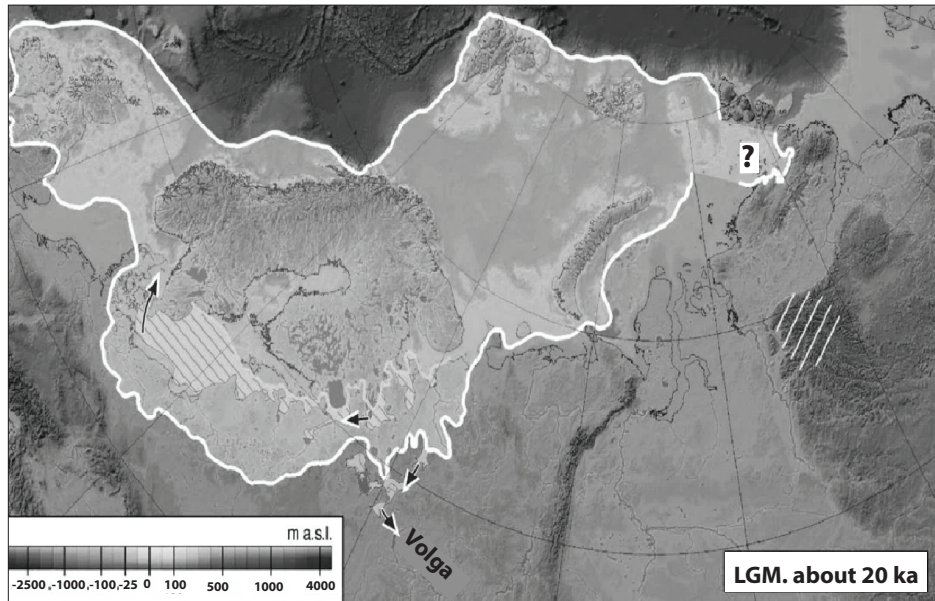
Öte yandan, atmosferdeki suyun anakaralar üzerinde buz biçiminde birikmesi nedeniyle, ortalama deniz düzeyi yeryüzüne yeni kara parçaları ekleyerek bugünkünden yaklaşık 120 m daha alçaktı. Örneğin, Kuzey Amerika ve Asya arasında bugünkü Bering Boğazı boyunca ve başka bir örnek olarak Avrupa anakarası ve Britanya arasında kara köprüleri oluşmuştu (Şekil 10). Aynı dönemde, yüksek enlemlerin permafrost toprakları ve tundra biyomu, bugünkünden daha güneye inmiş, tropikal yağmur ormanları biyomunun yayılış alanıysa görece daralmıştı. Tropikal iklimler karalar üzerinde 2-4 °C daha soğuktu ve olasılıkla okyanuslarda da bezer koşullar ortaya çıkmıştı. Soğuma ve buzullaşma yüksek enlemlerde daha kuvvetli olduğu için, deniz buzları (ör. Arktik ve Antarktik) bu bölgelerde daha fazla yayılış göstermekteydi. Genel olarak, küresel ortalama yüzey sıcaklığının, günümüzden olasılıkla 4-7 °C dolayında daha soğuk olduğu kestirilmektedir (Şekil 9).

5. Kuvvetlenen sera etkisi ve küresel ısınma

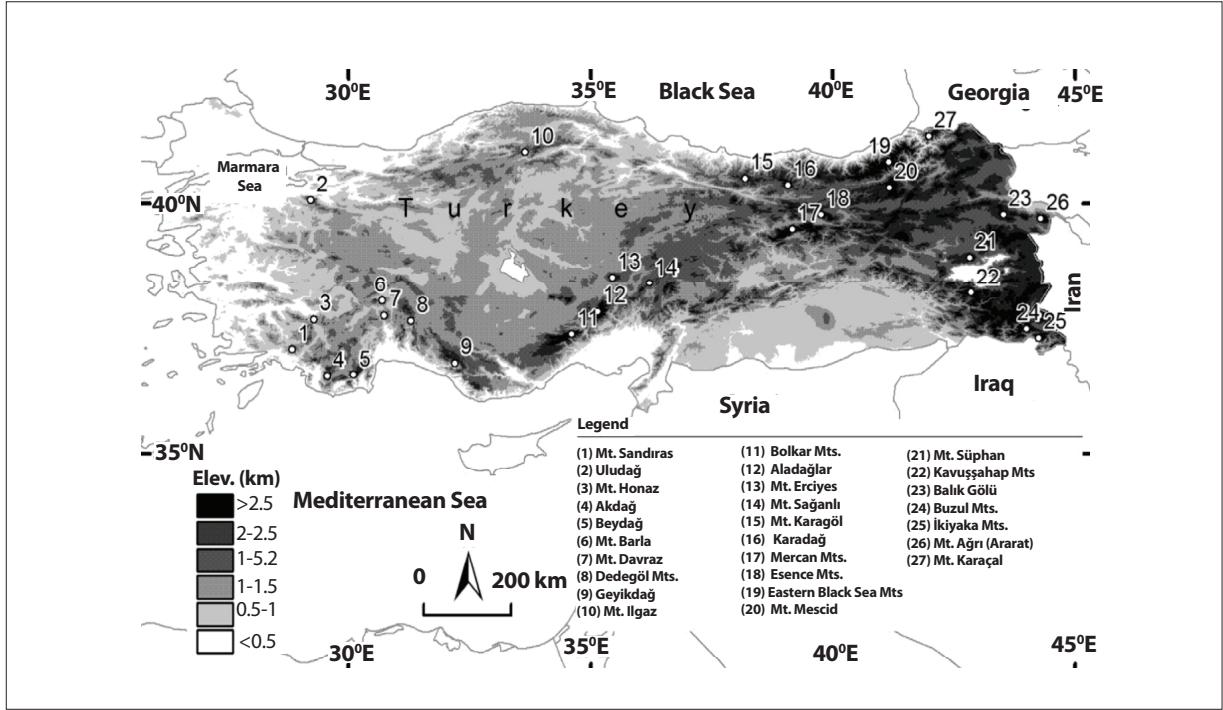
Atmosferdeki insan kaynaklı sera gazı birikimlerinde sanayi devriminden beri gözlenen artış sürmektedir. Özellikle atmosferdeki birikiminin büyüklüğü, artış hızı, 50-200 yıl arasında değişen yaşam süresi ve GUDB kızılotesi yer ışınımının büyük bölümünü emme özelliği dikkate alındığında, CO₂ 'nin önemi daha iyi anlaşılır. Yerküre atmosferindeki CO₂ birikimi çok hızlı bir biçimde artmaktadır. Aylık ortalama CO₂ zaman dizileri incelendiğinde, sanayi öncesinde yaklaşık 280 ppmv (milyon

hacimde bir molekül ya da milyonda bir parçacık) ve 1958 yılında yaklaşık 315 ppmv olan atmosferdeki yıllık ortalama CO₂ birikimi, 2012'de yaklaşık 394 ppmv ve Mayıs 2019'da 414.83 ppmv'ye ulaşmıştır (Türkeş, 2013b; Türkeş, 2016; Türkeş, 2018) (Şekil 12). Atmosferdeki CO₂ birikiminin günümüzdeki düzeyi, geçmiş yaklaşık 700 bin yıllık kayıttaki doğal CO₂ birikimi değişimlerinin (yaklaşık 180-300 ppmv arasında değişmiş) çok üzerindedir. Sera gazı birikimindeki bu artışlar, Yerküre'nin GUDB kızılotesi ışınım yoluyla soğuma etkinliğini zayıflatarak, onu daha fazla ısıtma eğilimindeki bir pozitif ışınım salınımının oluşmasını sağlar. Bu yüzden, *Yerküre/atmosfer ortak sisteminin enerji dengesine yapılan pozitif katkı*, kuvvetlenen sera etkisi olarak adlandırılır (Türkeş, 2008a; Türkeş, 2008b). Bu ise, Yerküre atmosferindeki doğal sera gazları (su buharı, CO₂, CH₄, N₂O ve O₃) sayesinde yüz milyonlarca yıldan beri çalışan bir küresel düzenek olan doğal sera etkisinin kuvvetlenmesi anlamını taşır.

Küresel ısınma, *sanayi devriminden beri, özellikle fosil yakıtların yakılması, ormansızlaşma, tarımsal etkinlikler ve sanayi süreçleri gibi çeşitli insan etkinlikleri ile atmosfere salınan sera gazlarının atmosferdeki birikimindeki hızlı artışa bağlı olarak, şehirleşmenin de katkısıyla doğal sera etkisinin kuvvetlenmesi sonucunda, yeryüzünde ve atmosferin alt katmanlarında saptanan sıcaklık artışı şeklinde tanımlanabilir (Türkeş, 2016; Türkeş, 2017)*. Tanımdan da anlaşılacağı gibi, insan kaynaklı iklim değişikliğine ve küresel ısınmaya yol açan sera gazları; çoğunlukla fosil yakıtların yakılması (enerji ve çevrim),



Şekil 10. Avrasya'nın Kuzeyinde Geç Pleyistosen Würm Buzullaşmasının Son Buzul Maksimumunda Örtü Buzullarının Kapladığı Alanların Coğrafi Dağılışı (Mangerud ve ark., 2004)

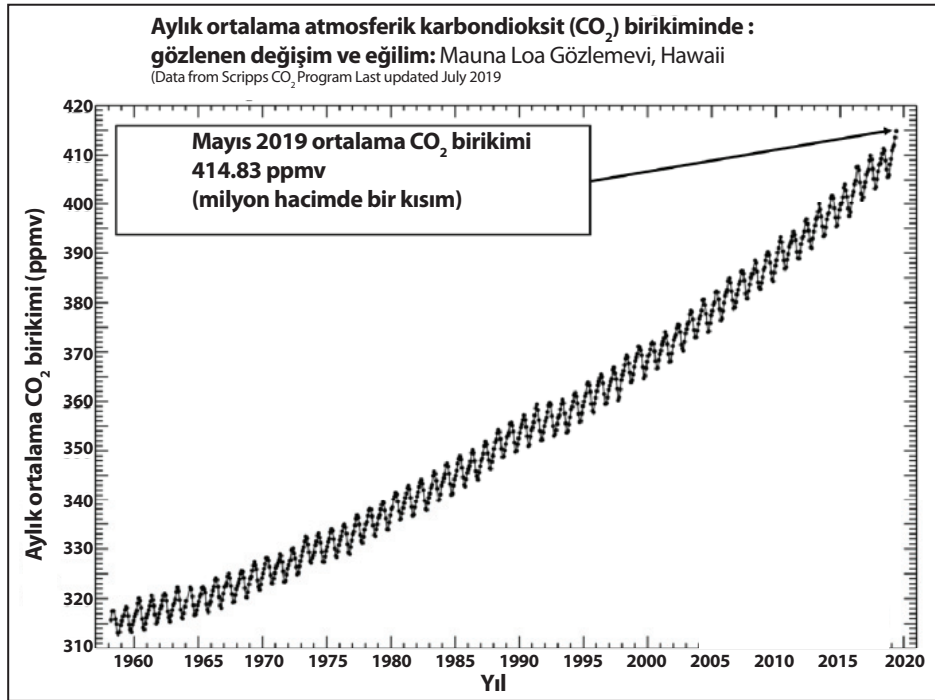


Şekil 11. Türkiye’de Kuvaterner buzullaşmasının yaşandığı dağların isimleri ve coğrafi dağılışı (Sarıkaya ve ark., 2011)

sanayi (enerji ilişkili; kimyasal süreçler ve çimento üretimi, vb. enerji dışı), ulaştırma, arazi kullanımı değişikliği, atık yönetimi ve tarımsal (enerji ilişkili; arazı yakma, çeltik üretimi, hayvancılık ve gübreleme vb. enerji dışı) etkinliklerden kaynaklanır.

6. Tartışma

İklim Değişikliği günümüzde üzerinde en çok durulan, en çok bilimsel araştırma yapılan ve hükümetler arası düzeyde en çok tartışılan küresel değişiklik konularının başında gelmektedir. Öngörülen iklim



Şekil 12. Atmosferdeki CO₂ birikiminin 1958-2018 yılları arasındaki aylık değişimleri ve uzun süreli eğilimi (Keeling ve ark., 2005; http://scrippsco2.ucsd.edu/data/atmospheric_CO2/primary_mlo_co2_record, erişim: 10.07.2019)

değişiklikleri, su kaynakları, tarım, doğal ekosistemler ve insan sağlığı üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkilere sahiptir. İklimdeki değişiklikler büyüdükçe, olumsuz etkilerin egemenliği de artar. Sosyoekonomik sektörler (ör. tarım, ormancılık, balıkçılık, su kaynakları ve insan yerleşmeleri, vb.), kara ve su ekosistemleri ile insanoğlunun gelişimi ve refahı için çok yaşamsal olan insan sağlığı, hava ve iklim ekstremeleri ve afetleri ile iklimsel değişkenlikteki değişiklikler kadar, iklim değişikliklerinin büyüklük ve hızlarına karşı da oldukça duyarlıdır.

Etkileri açısından bu kadar çok farklı ve önemli değişiklik öngörüsü, uyumun, iklim değişikliğinin etkilerini en aza indirme çabalarını sürdürme ve tamamlama açısından gerekli ve yaşamsal bir strateji olduğunu gösterir. Sera gazı salımlarının bugünkü düzeyinde ya da üzerinde sürmesi, daha fazla ısınmaya ve büyük olasılıkla, iklim sisteminde 21. yüzyıl süresince 20. yüzyılda gözlenenenden daha büyük düzeylerde olabilecek birçok değişikliğe neden olacaktır. İnsan kaynaklı ısınma ve deniz seviyesi yükselmesi, sera gazı birikimleri belirli bir düzeyde durdurulsa bile, iklim süreçleri ve geri beslemeleri ile bağlantılı zaman ölçeklerinin çok değişik ve uzun olması yüzünden, yüzyıllarca sürebilecektir. Bu da, toplumlar için olumsuz sonuçlar yaratarak, kalkınmanın önünde büyük bir engel oluşturacaktır. Öngörülen iklim değişikliklerini ve bu değişikliklerin, sosyoekonomik sektörler, doğal ekosistemler ve insan sağlığı üzerindeki olası olumsuz etkilerini en aza indirmenin en önemli yolu, insan kaynaklı sera gazı salımlarını azaltmak ve yutakları çoğaltmaktır.

Küresel iklim en başından beri alan ve zamanda çok önemli değişikliklere ve değişkenliklere sahne olmuştur. İklim değişikliği açısından çok önemli zamansal (ör. Yıllar arasından on yıllara, on yıllardan binlerce yıllara ve milyonlarca yıllık zaman ölçeklerinde değişen) ve alansal (ör. yarı küresel, kıtasal, alt kıtasal, bölgesel, bölümsel, yöresel, vb.) farklılıklar ortaya çıkmıştır.

Örneğin, küresel iklim son bin yıldaki çeşitli içsel ve dışsal iklimsel zorlamalar görece küçük genlikli olmasına karşın, yüzey sıcaklıklarının küresel ölçekteki değişikliklerinde baskın bir rol oynamıştır. Tersine, bölgesel ölçekte, okyanus ya da atmosfer dolaşımındaki değişiklikler zorlamaların bazı dönemlerdeki etkilerini tümüyle maskeleyebilmiştir. Özellikle KYK'de son 1,300 yılın iklim koşullarındaki değişikliklerin ve eğilimlerin neredeyse tüm alan ve zaman ölçeklerinde önemli farklılıklar gösterdiğini, örneğin 'Orta Çağ Sıcak Dönemi'nin ve 'Küçük Bu-

zul Çağı'nın, genel olarak, İber Yarımadası, Britanya Adaları, Alp Dağları, Batı ve Kuzey Avrupa bölgelerinde başka, Anadolu'da başka etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, Ortaçağ Sıcak Anomalisi ve Küçük Buzul Çağı, küresel olarak ya da neredeyse küresel olarak eş zamanlı olaylar olarak görülmemelidir. Bu kapsamda, Orta Çağ ya da Yeni Çağdaki, örneğin 16., 17., 18. ya da 19. yüzyıllardaki belirgin ve önemli tarihsel, sosyal ve ekonomik gelişmeleri, olayları, ayaklanmaları ya da bunalımları (ör. Osmanlı İmparatorluğu'nda 17. yy'da, vb.) incelerken, konunun doğal ortam, ekosistem ve iklimdeki değişikliklerle bağlantısının kurulmasında, genel olarak Alpler ve Batı Avrupa bölgelerindeki iklim değişikliklerinin, Osmanlı İmparatorluğu dönemindeki Balkanlar, Anadolu ve Mezopotamya bölgelerine farklı yansıdığı ve farklı sonuçlar doğurduğu bilimsel gerçeği mutlaka dikkate alınmalıdır.

Kaynaklar

- Akçar, N. and Schlüchter, C.** (2005) *Paleoglaciations in Anatolia: a schematic review and first results. Eiszeitalter und Gegenwart*, 55: 102-121.
- Bayraktar, C. ve Özdemir, H.** (2010) *Kaçkar Dağı'nda bakı faktörünün glasiyal ve periglasiyal topografya gelişimi üzerindeki etkisi. Türk Coğrafya Dergisi*, 54: 1-13.
- Bayraktar, C., Çılgın, Z., Döker, M. F. ve Canpolat, Ergin.** (2015) *Evidence of an active glacier in the Munzur Mountains, eastern Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences* 24: 56-71
- Berger, A.L.** (1978) *Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes. Journal of Atmospheric Sciences*, 35: 2363-2367.
- Çiner, A.** (2004) *Turkish glaciers and glacial deposits. pp.419-429: In: Ehlers, J. and Gibbard, P.L. (Eds). Quaternary Glaciations: Extent and Chronology, Part. I: Europe. Elsevier Publishers, Amsterdam.*
- Doğu, A. F., Somuncu, M., Çiçek, I., Tunçel, H. ve Gürgen, G.** (1993) *Kaçkar dağında buzul şekilleri, yaylalar ve turizm. Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, 2: 157-184.
- Erinç, S.** (1952) *Glacial evidences of the climatic variations in Turkey. Geografiska Annaler*, 34: 89-98.
- Erinç, S.** (1953) *Van'dan Cilo Dağlarına. İstanbul Üniversitesi Coğrafya Enstitüsü Dergisi*, 2: 84-106.
- Erinç, S.** (1978) *Changes in the physical environment in Turkey since the end of the Last Glacial. pp.87-110: W.C. Brice (Ed.). The Environmental History of the Near and Middle East since the Last Ice Age. Academic Press, London.*
- Erlat, E.** (2010) *İklim Sistemi ve İklim Değişimleri. Genişletilmiş 2. Baskı, Ege Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Yayınları: 155, İzmir.*
- Erlat, E. ve Türkes, M.** (2015) *20. Yüzyılın ikinci yarısında tropikal kuşakta gerçekleşen volkanik püskürmelerin Türkiye'de yaz hava sıcaklıklarına etkisi. Ege Coğrafya Dergisi* 24(1): 1-14.
- Erlat, E. and Türkes, M.** (2019) *Temperature responses of*

Turkey's climate to the tropical volcanic eruptions over second half of the twentieth century *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2711-2>

Erol, O. (1981) Quaternary pluvial and interpluvial conditions in Anatolia and environmental changes especially in south-central Anatolia since the last glaciation. PP. 101-109W. Frey and H.P. Uerpman (Eds.): *Beitraege zur Umweltgeschichte des vorderen Orients, Beihefte zum Tuebinger Atlas des Vorderen Orients*.

Goosse, H., P.Y. Barriat, W. Lefebvre, M.F. Loutre and V. Zunz. (2010) *Introduction to Climate Dynamics and Climate Modelling - Chapter 5. Brief history of climate: causes and mechanisms*. <http://www.climate.be/textbook>.

IPCC, (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T.F., et al. (eds.): Cambridge University Press, Cambridge and New York.

İzıbrak, R. (1951) Cilo Dağı ve Hakkari ile Van Gölü Çevresinde Coğrafya Araştırmaları. Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih Coğrafya Fakültesi Yayını: 67 (4), Ankara.

Keeling, C. D., S. C. Piper, R. B. Bacastow, M. Wahlen, T. P. Whorf, M. Heimann, and H. A. Meijer. (2005) Atmospheric CO₂ and 13 CO₂ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: observations and carbon cycle implications, pages 83-113, in "A History of Atmospheric CO₂ and its effects on Plants, Animals, and Ecosystems", editors, Ehleringer, J.R., T. E. Cerling, M. D. Dearing, Springer Verlag, New York.

Kurter, A. (1991) *Glaciers of Middle East and Africa - Glaciers of Turkey*. pp.1-30: R.S. Williams and J.G. Ferrigno (Eds.). *Satellite Image Atlas of the World*, USGS Professional Paper.

Mangerud, J. et al. (2004) Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews*, 23: 1313-1332.

Sarıkaya, M.A., Çiner, A. and Zreda, M. (2011) Quaternary Glaciations of Turkey. pp. 393-403: J. Ehlers, P.L. Gibbard and P.D. Hughes (Eds.). *Quaternary Glaciations-extent and chronology; a closer look*. Elsevier Pub., *Developments in Quaternary Science*, Vol. 15, Amsterdam.

Turoğlu, H. (2011) *Buzullar ve Buzul Jeomorfolojisi*. Çantay Kitapevi, İstanbul.

Türkeş, M. (2000) 'El Niño-Güneyli Salınım ekstremleri ve Türkiye'deki yağış anomalileri ile ilişkileri'. *Çevre, Bilim ve Teknoloji*, 1: 1-13.

Türkeş, M. (2008a) Küresel iklim değişikliği nedir? Temel kavramlar, nedenleri, gözlenen ve öngörülen değişiklikler. *İklim Değişikliği ve Çevre*, 1: 45-64.

Türkeş, M. (2008b) İklim değişikliği ve küresel ısınma olgusu: Bilimsel değerlendirme. S: 21-57. E. Karakaya (ed.). *Küresel Isınma ve Kyoto Protokolü: İklim Değişikliğinin Bilimsel, Ekonomik ve Politik Analizi*. Bağlam Yayınları, İstanbul.

Türkeş, M. (2010) *Klimatoloji ve Meteoroloji*. Birinci Baskı, Kriter Yayınevi: 650 + XXII sayfa, İstanbul.

Türkeş, M. (2013a) İklim Değişiklikleri: Kambriyen'den Pleistosen'e, Geç Holosen'den 21. Yüzyıla. *Ege Coğrafya Dergisi*, 22(1): 1-25.

Türkeş, M. (2013b) Türkiye'de gözlenen ve öngörülen iklim değişikliği, kuraklık ve çölleşme. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2): 1-32.

Türkeş, M. (2015) *Biyocoğrafya: Bir Paleocoğrafya ve Ekoloji Yaklaşımı*. Gözden Geçirilmiş İkinci Basım, Kriter Yayınevi Fiziki Coğrafya Serisi No: 3, ISBN: 978-605-4613-87-8, 457 + XXXL sayfa. Sonçağ Yayıncılık Matbaacılık Reklam ve Sanayi Tic. Ltd. Şti: Ankara.

Türkeş, M. (2016) Küresel İklim Değişiklikleri ve Başlıca Nedenleri ile Dünya'da ve Türkiye'de Gözlenen ve Öngörülen İklim Değişiklikleri ve Değişkenliği. İçinde: "Küresel İklim Değişikliği ve Etkileri" Engin Ural Anısına (Ed: M. Somuncu), s. 71-115. Türkiye Çevre Vakfı Yayını, Ankara.

Türkeş, M. (2017) *Genel Klimatoloji: Atmosfer, Hava ve İklimin Temelleri*. Gözden Geçirilmiş İkinci Baskı, Kriter Yayınevi Fiziki Coğrafya Serisi No: 4, ISBN: 978-605-9336-28-4, xxiv + 520 sayfa. Kriter Yayınevi, Berdan Matbaası: İstanbul.

Türkeş, M. and Erlat, E. (2018) A scientific assessment of observed changes and trends in extreme weather and climate events in the world and Turkey. In Meltem Ucal (Ed.), *Climate Change and Green Perspective: Green Economy, Green Growth* (pp. 5-38). Istanbul, Turkey: Heinrich Böll Stiftung Foundation.

www.globalwarmingart.com/wiki/File:65Myr_Climate_Change_Rev_png, Erişim Tarihi 23 Haziran 2013.

http://scrippsco2.ucsd.edu/data/atmospheric_co2/primary_mlo_co2_record, Erişim Tarihi 10 Temmuz 2019

<https://www.earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page3.php>; Erişim Tarihi 10 Mart 2019.

<https://www.co2.earth/earths-co2-main-page>, Erişim Tarihi 10 Temmuz 2019.

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN FİZİKSEL BİLİM TEMELİ -II

Dünyada ve Türkiye’de Gözlenen ve Öngörülen İklim Değişiklikleri ve Değişkenliği

Murat TÜRKŞ*

Öz: Sera gazlarının atmosferdeki birikimlerinin çeşitli insan etkinlikleri nedeniyle sanayi devriminden beri hızla artması sonucunda kuvvetlenen sera etkisinin en önemli sonucu, Yerküre'nin enerji dengesi üzerinde ek bir pozitif ışımsal zorlama oluşturarak, dünya ikliminin daha sıcak ve daha değişken olmasını sağlamasıdır. Öte yandan, ister küresel isterse bölgesel ölçekte olsun, iklim değişikliği, ekstrem (aşırı) hava ve iklim olaylarının sıklığında, şiddetinde, alansal dağılışında, uzunluğunda ve zamanlamasında da önemli değişikliklerin gerçekleşmesine neden olmaktadır. Örneğin, alansal ve zamansal olarak yüksek bir değişkenlikle nitelenen yağışlarda, 1950 - 2011 döneminde dünyanın çeşitli bölgelerinde önemli azalış ve artış eğilimleri gözlenmiştir. Ayrıca, dünyanın birçok bölgesinde ve Türkiye'deki şiddetli yağış olaylarında da artışlar gözlenmiş; bazı ekstremelerde de önemli değişiklikler ortaya çıkmıştır. Uzun süreli klimatolojik gözlem dizilerinin çözümlenmelerine dayanan güncel bulgulara göre, aşırı hava ve iklim olaylarındaki değişiklikler Türkiye’de, özellikle 1990’lı yıllarla birlikte yaz ve tropik gün sayılarındaki önemli artış, buna karşılık don olayı ve kar yağışlı gün sayılarında belirgin azalma, yılın don olayı gözlenmeyen devresindeki uzama şeklinde gözlenmiştir. Türkiye’de 2000 yılından bu yana maksimum hava sıcaklıklarına ilişkin rekorların yaklaşık %50’si gerçekleşirken, bu oran minimum sıcaklıklara ait rekorlarda %10’a kadar düşmüştür. Başka bir deyişle, Türkiye’de yaklaşık son 25 yıllık dönemde, hem sıcaklık rejimi belirgin olarak daha ılıman ve sıcak koşullara doğru değişmiş, hem de sıcak hava dalgalarının sıklığında ve şiddetinde önemli değişimler gerçekleşmiştir. Gözlenen değişim ve eğilimlere ek olarak, iklim model benzeşimleri, genel olarak alt troposfer ve yüzey hava sıcaklıklarında öngörülen artış eğilimi, artan termal enerji (pozitif ışımsal zorlama) ve hızlanan ve/ya da kuvvetlenen hidrolojik döngü ile bağlantılı olarak, 21. yüzyılda Dünya’nın birçok bölgesinde aşırı hava ve iklim olaylarının sıklık ve/ya da şiddetinde artışlar olabileceğini göstermektedir. Bu makalenin ana amacı, Dünya’da ve Türkiye’de gözlenen iklim değişikliği ile çeşitli sera gazı salım senaryolarına dayanarak çalışılan iklim model kestirimlerine göre gelecekteki iklim değişikliği ve değişkenliğinin, hem var olan çok sayıda yayımlanmış hakemli makale ve bildirilerden hem de bu çalışma için gerçekleştirilen özgün analiz (çözümleme) ve değerlendirmelerden yararlanarak geniş açılı ve çok disiplinli bilimsel bir sentezini (bişimini) yapmaktır.

Anahtar sözcükler: ışımsal zorlama, kuvvetlenen sera etkisi, iklim değişikliği, küresel ısınma, aşırı hava ve iklim olayları, sera gazı salım senaryoları, iklim model öngörülürü, 1.5 °C’lik küresel ısınma

Physical Science Basis of Climate Change II:

Observed and Projected Climate Change and Variability in Turkey and in the World

Abstract: Global concentration of greenhouse gases in the atmosphere is increasing rapidly since industrial revolution as a result of human activities. The most important outcome of this aggravated greenhouse effect is warmer and more variable climate in the world through additional positive radiative forcing on the energy balance of the planet. Meanwhile, climate change causes, whether at global or regional levels, significant changes in the frequency, severity, spatial distribution, duration and timing of extreme weather and climate events. For example, precipitation has become highly variable both spatially and temporally in various regions of the world with significant decreases and increases in the period 1950 – 2011. Further, there has been increase in cases of heavy rainfall in many parts of the world and in Turkey and some important changes occurred in some extremes. According to current findings based on the analysis of long-term climatologic observation series, changes in extreme weather and climate events manifest themselves in Turkey starting with the 1990s as significant increase in the number of summer and tropic days, marked decrease in the number of days of frost and snow and longer yearly periods without frost. In Turkey, about 50% of maximum temperatures ever recorded took place since the year 2000 whereas it turned out as only 10% when it comes to minimum temperatures ever recorded. In other words, during the last 25 years there has been a change towards more temperate and warm conditions accompanied by significant changes in the frequency and severity of heat waves. In addition to changes and trends observed, climate model simulations suggest that in the 21st century there may be increases in the frequency and severity of extreme weather and climate events in many regions of the world associated with increasing temperatures in sub-troposphere and surface, increased thermal energy (positive radiative forcing) and accelerated and/or stronger hydraulic cycle. The main objective of the present article is to reach an extensive and multi-disciplinary synthesis regarding future climate change and variability according to climate model projections deriving from climate change patterns in the world and in Turkey based on various greenhouse gas emission scenarios and by making use of existing many peer-reviewed articles, relevant declarations and original analysis and assessments made specifically for the present article.

Key words: Radiative forcing; Enhanced greenhouse effect; Climate change; Global warming; Extreme weather and climate events; Greenhouse gas emission scenarios; Climate model projections; 1.5 °C Global Warming

1. Dünyada ve Türkiye’de gözlenen iklim değişimleri

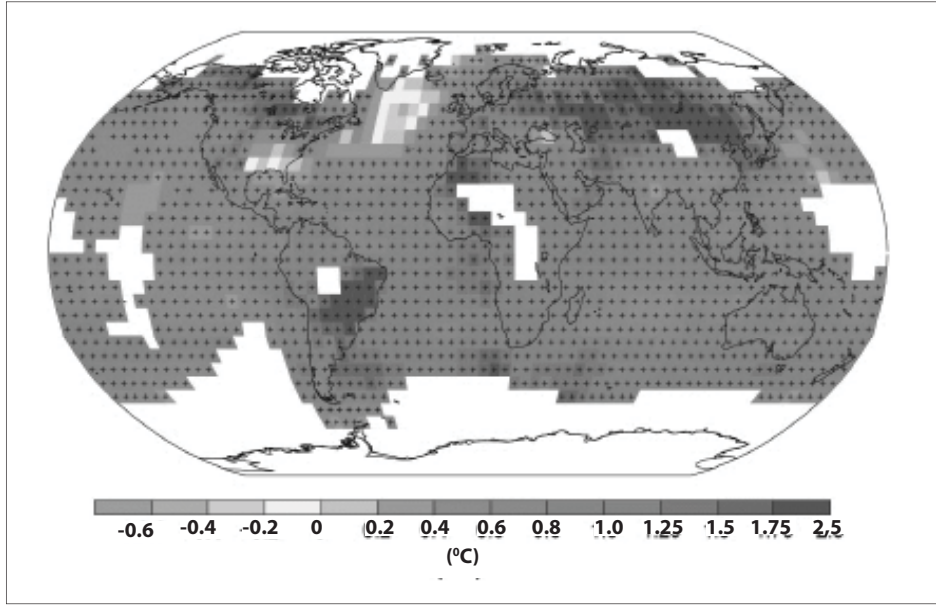
Sera gazlarının atmosferdeki birikimlerinin çeşitli insan etkinlikleri nedeniyle sanayi devriminden beri hızla artması sonucunda kuvvetlenen sera etkisinin en önemli sonucu, Yerküre’nin enerji dengesi

üzerinde ek bir pozitif ışımsal zorlama oluşturarak, dünya ikliminin daha sıcak (Şekil 1), bazı bölgelerde daha kurak (Şekil 2) ve daha değişken olmasını sağlamasıdır. İster küresel isterse bölgesel

*Prof. Dr., Boğaziçi Üniversitesi İklim Değişikliği ve Politikaları Uygulama ve Araştırma Merkezi Yönetim Kurulu ve Fizik Bölümü Yarı Zamanlı Öğretim Üyesi (ORCID No: 0000-0002-9637-4044)

Geliş Tarihi / Received :10.03.2019

Kabul Tarihi / Accepted : 28.05.2019



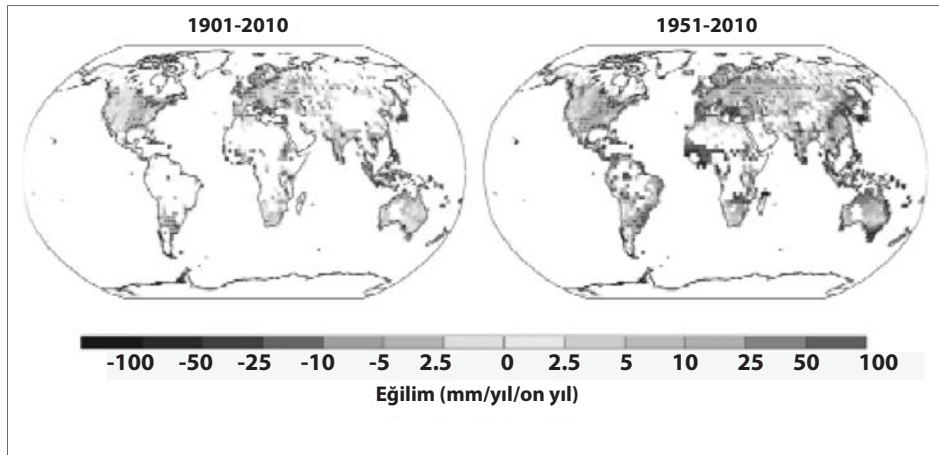
Şekil 1. Yıllık ortalama yüzey sıcaklıklarında 1901-2012 dönemi için hesaplanan doğrusal eğilim oranlarına göre gözlenen değişikliklerinin alansal dağılışı (IPCC, 2013)

ölçekte olsun, iklim değişikliği aşırı hava ve iklim olaylarının sıklığında, şiddetinde, alansal dağılışında, uzunluğunda ve zamanlamasında değişiklikler oluşmasına neden olmaktadır. Örneğin, yağış, küresel ölçekte 1900–2012 döneminde alansal ve zamansal olarak yüksek bir değişkenlik göstermiş ve yağış tutarlarında bölgesel ölçekte kuraklaşma ve artış eğilimleri gözlenmiştir (Şekil 2). Kuzey ve Güney Amerika'nın doğu bölümleri, Kuzey Avrupa ve Asya'nın orta bölgeleri ile kuzeyinde kaydedilen yağış tutarlarında önemli artış eğilimleri gözlenirken, önemli kuraklaşma ya da *azalış eğilimleri* ise Sahel, Türkiye'yi de içeren Akdeniz havzası, Güney Asya'nın bir bölümü ile Afrika'nın güneyinde etkili olmuştur (IPCC, 2013; Türkeş, 2012a; Türkeş,

2012b; Türkeş, 2013b). Ayrıca, dünyanın birçok bölgesi ve Türkiye'deki şiddetli yağış olaylarında (aşırı yüksek ve aşırı düşük yağışlar, vb.) ve *ortalama hava sıcaklıklarında da önemli artışlar* gözlenmiştir (IPCC, 2013; Türkeş, 2013c; Türkeş, 2014a).

1.1 Küresel iklimde gözlenen değişimler

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) 5. Değerlendirme Raporu kapsamında 1. Çalışma Grubunun hazırladığı İklim Değişikliğinin Fiziksel Bilim Temeli Raporu'na göre, *küresel iklimdeki ısınma kesindir ve 1950'li yıllardan beri iklimde gözlenen değişikliklerin çoğu son bin yıllık döneme kadar daha önce hiç görülmemiş düzeydedir (IPCC, 2013)*. Geçen 30 yılın her 10 yılı, yeryüzünde 1850'den beri



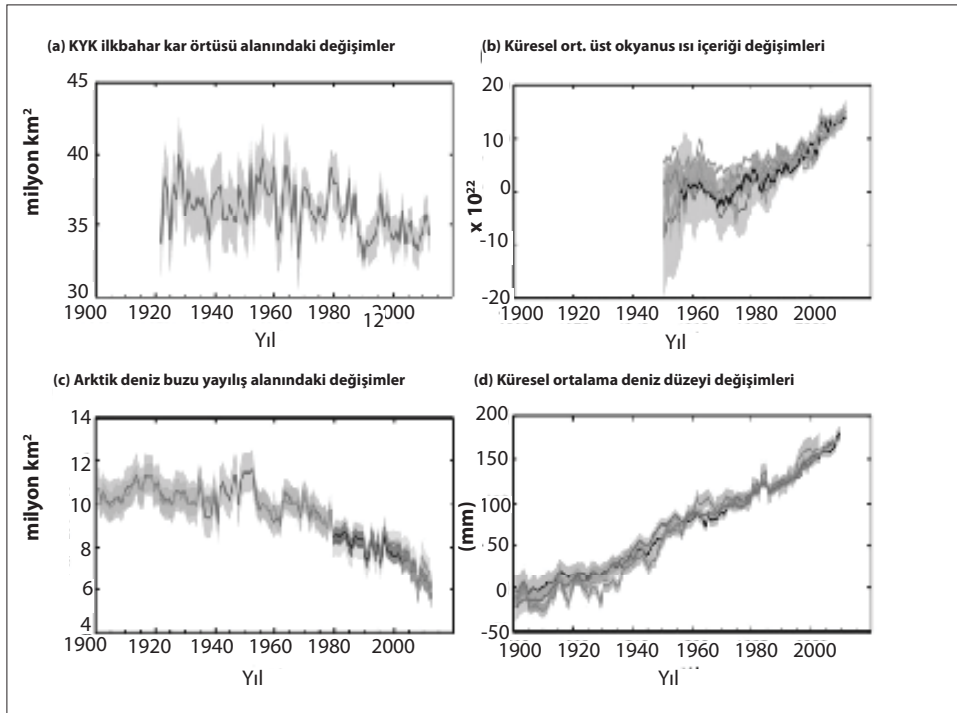
Şekil 2. Doğrusal eğilim hesaplamalarına göre, (a) 1901 – 2010 ve (b) 1951 – 2010 dönemlerinde gözlenen yağış değişikliklerinin alansal dağılış desenleri (IPCC, 2013)

kaydedilen küresel yüzey sıcaklıklarının tüm on yıllık dönemlerinden daha sıcak olmuştur. Küresel ortalama yüzey sıcaklığı verileri, 1901 – 2010 döneminde, 0.89 °C'lik [0.69 – 1.08 °C güven aralığında] doğrusal bir artış göstermiştir. Bu dönem boyunca hemen tüm Yerküre yüzeyi (Şekil 1) ve atmosferin yaşamın ve hava olaylarının olduğu en alt katmanı olan Troposfer, küresel olarak 20'nci yüzyılın ortalarından beri ısınmıştır. 2018 yılı gözlemlerini de içeren son değerlendirmeler göre, küresel yüzey sıcaklıklarındaki değişimlere dayanarak belirlenen küresel ısınma değeri 1,064 °C'ye ulaşmıştır (<http://www.globalwarmingindex.org/>). Ayrıca, dolaylı eski iklim verileri, Kuzey Yarım Küre'de 1983 – 2012 döneminin olasılıkla son 1400 yılın en sıcak 30 yıllık dönemi olduğunu gösterir. Bu dönemde, atmosfer ve okyanuslar ısınmış, kar ve buz tutarları azalmış, ortalama deniz düzeyi yükselmiş ve sera gazlarının atmosferdeki birikimleri artmıştır (Şekil 3).

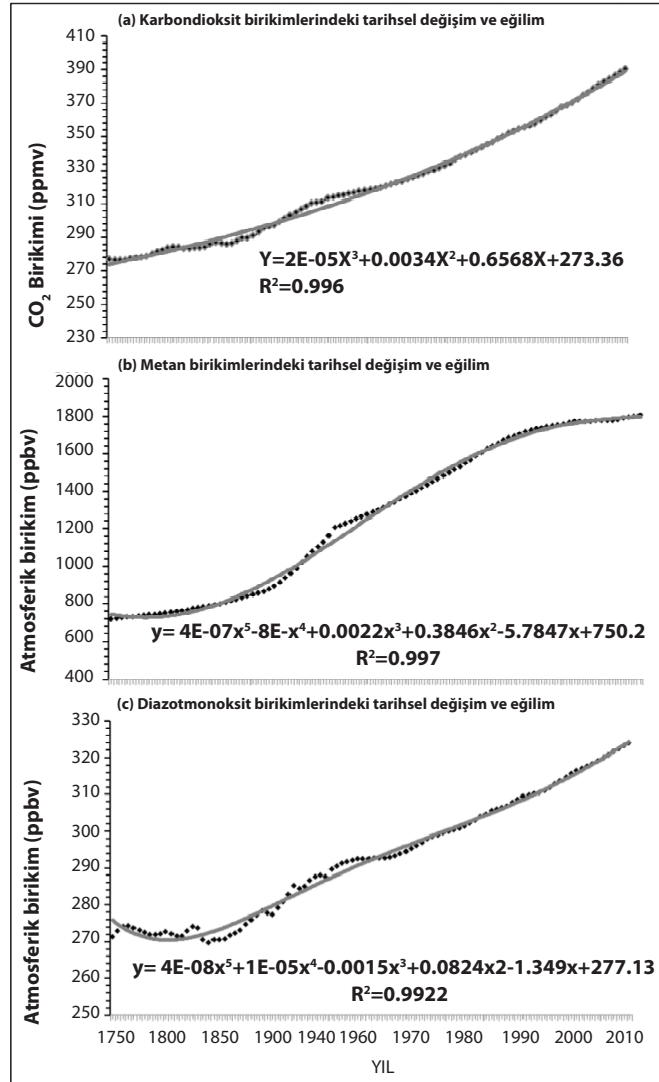
Kuzey Yarımküre karalarında yağışlar, 1901'den beri artmıştır. Akdeniz Havzası'nı ve Türkiye'nin Akdeniz ikliminin egemen olduğu batı ve güney bölgelerini içeren subtropikal ve bazı tropikal bölgelerde ise, aynı dönemde yağış tutarlarında belirgin azalışlar gözlenmiştir (Şekil 2). Birçok aşırı hava ve iklim olaylarında 1950'den beri değişiklikler olduğu gözlenmiştir.

Yüksek olasılıkla, küresel ölçekte soğuk gün ve gecelerin sayıları azalmış, sıcak gün ve gecelerin sayısı artmıştır. Avrupa, Asya ve Avustralya'nın geniş bölgelerinde sıcak hava dalgalarının sıklığı *olasılıkla* artmıştır. Kuvvetli yağış olaylarının sayısının artış gösterdiği kara bölgeleri, kuvvetli yağışların azaldığı karalardan *olasılıkla* daha fazladır. Kuvvetli yağış olaylarının sıklığı ya da şiddeti *olasılıkla* Kuzey Amerika ve Avrupa'da artmıştır.

Beklendiği gibi, küresel okyanuslardaki ısınma iklim sisteminde biriken enerjideki artışı denetlemektedir. Bu kapsamda, 1971-2010 döneminde okyanuslarda biriken enerjinin %90'dan fazlası okyanuslardaki ısınmayla bağlantılıdır (Şekil 3b). Üst okyanus (0-700 m) 1971-2010 döneminde *kesin olarak* ısınmışken, 1870'ler ve 1971 arasında *olasılıkla* ısınmıştır. Bu dönemde üst okyanus ısı içeriğinde belirlenen doğrusal artış eğilimi, *olasılıkla* 17 [15-19] x 10²²J değerindedir (IPCC, 2013) (Şekil 3b). Ayrıca, buharlaşmanın yağıştan fazla gerçekleştiği yüksek tuzluluk bölgeleri daha tuzlu olurken, yağışın buharlaşmadan fazla olduğu düşük tuzluluk bölgeleri 1950'lerden beri daha az tuzlu olmuştur. Okyanus tuzluluğunda gözlenen bu bölgesel eğilimler, okyanuslar üzerindeki buharlaşma ve yağışın değiştiğine ilişkin dolaylı kanıtlar sunmaktadır.



Şekil 3. (a) Kuzey Yarımküre ilkbahar kar örtüsünün kapladığı alandaki, (b) küresel ortalama üst okyanus ısı içeriğindeki, (c) Arktik deniz buzunun yayılış alanındaki ve (d) küresel ortalama deniz düzeyinde gözlenen uzun süreli eğilimler ve yıllararası değişimler (IPCC, 2013)

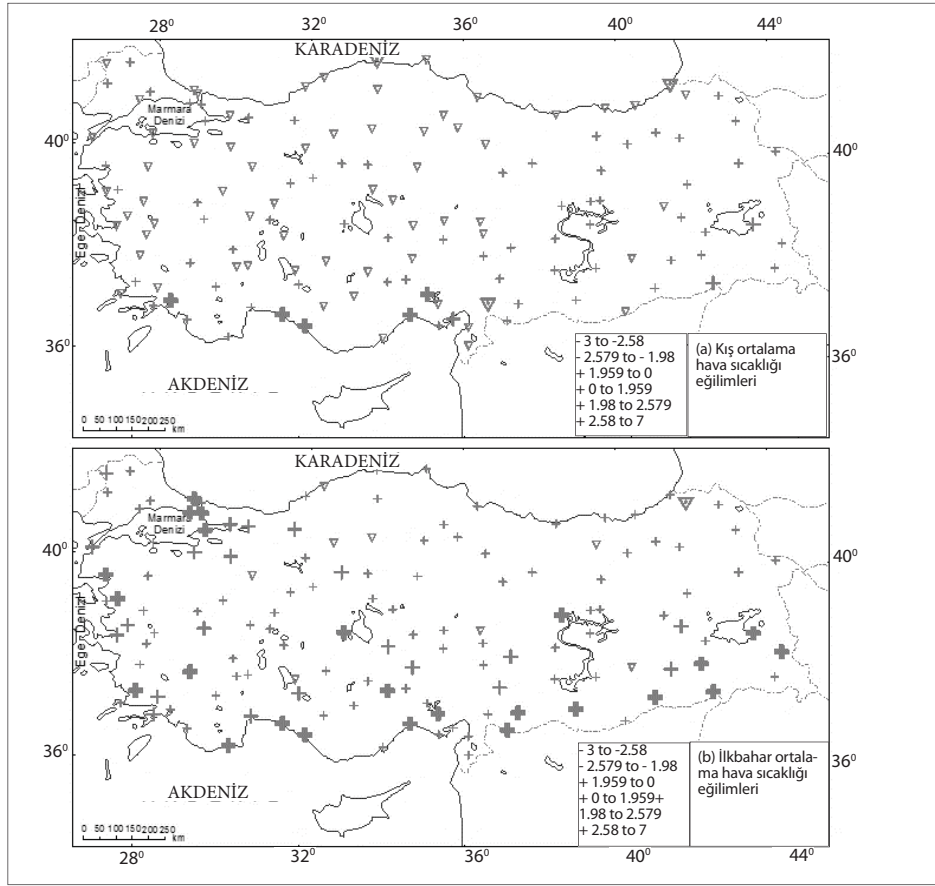


Şekil 4. Atmosferdeki (a) CO₂, (b) CH₄ ve (c) N₂O gazlarının sanayi öncesinden günümüze değin yıllık ortalama birikimlerinde gözlenen uzun dönemli değişimler ile 3. ve 5. dereceden polinom regresyon eğrilerine göre uzun süreli eğilimler. IPCC'de (2013) verilen orijinal verilerden yararlanarak Türkeş (2017a) tarafından çözümlendi ve çizildi. [Veri Kaynağı: IPCC, 2013: Annex II: Climate System Scenario Tables [Prather, M., G. Flato, P. Friedlingstein, C. Jones, J.-F. Lamarque, H. Liao and P. Rasch (eds.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. pp. 1395-1445.]

Grönland ve Antarktika buz kalkanları geçen 20 yıllık dönemde kütle kaybetmekte, dağ vadi ve takke buzulları buzullar neredeyse küresel ölçekte küçülmekte, Arktik deniz buzu ve Kuzey Yarımküre ilkbahar kar örtüsü alansal olarak azalmasını sürdürmektedir (Şekil 3a ve 3c). 19. yüzyıl ortasından beri gözlenmiş olan deniz düzeyi yükselmesinin hızı, önceki iki bin yıllık dönemdeki ortalama yükselme oranından daha büyüktür. Küresel ortalama deniz düzeyi 1901 – 2010 döneminde 19 cm (0.19 [0.17 – 0.21] m) yükselmiştir (IPCC, 2013) (Şekil 3d). 1970'lerin başından beri, ısınmadan kaynaklanan buzulların kütle kaybı ve okyanusların termal

genleşmesi, gözlenen küresel ortalama deniz düzeyi yükselmesinin yaklaşık %75'inden sorumludur. Geçmişteki deniz düzeyi değişikliklerinin ise, farklı etmenler (örn. Yerküre ve Güneş arasındaki ilişkilerdeki değişimler) yoluyla oluştuğu düşünülmektedir (IPCC, 2013).

CO₂, CH₄ ve N₂O gazlarının atmosferik birikimleri, en azından son 800,000 yıllık dönemde hiç olmadığı kadar yüksek bir düzeye ulaşmıştır. CO₂, CH₄ ve N₂O gazlarının atmosferdeki birikimleri, insan etkinlikleri (temel olarak fosil yakıt yanması ve ikincil olarak net arazi kullanımı değişikliğinden



kaynaklanan salımlar) nedeniyle 1750 yılından beri artmıştır (Şekil 4). Bu gazların 2011 birikimleri, sanayi öncesi düzeylerine göre sırasıyla %40, %150 ve %20 oranında artarak, aynı sırayla 391 ppmv (kısaca milyonda bir), 1803 ppbv (milyarda bir) ve 324 ppbv (milyarda bir) düzeylerine yükselmiştir. Okyanuslar ise, atmosfere salınan insan kaynaklı karbonun yaklaşık %30'unu emerek asitlenmiştir.

1.2 Türkiye ikliminde gözlenen değişimler

Bu bölümde, Türkeş (2013b)'in Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün (MGM) klimatoloji ve meteoroloji istasyonlarında 1950-2010 döneminde kaydedilen aylık ortalama, aylık ortalama maksimum (en yüksek) ve aylık ortalama minimum (en düşük) hava sıcaklığı verilerinin (°C) ile aylık toplam yağış (mm ya da kg/m²) istatistiksel ve klimatolojik zaman dizisi çözümlerinin sonuçları kullanılarak, Türkiye'deki yağış ve hava sıcaklığı dizilerindeki uzun

süreli eğilimler ve değişimler incelendi. İstasyon verilerindeki eğilimleri belirlemek amacıyla, uzun süreli zaman dizilerine Mann-Kendall (M-K) sıra ilişki katsayısı yöntemi uygulandı (Sneyers, 1990; Türkeş ve ark., 2002). Verilerin türdeşliği, sürekliliği, aylık eksik verilerin o istasyondaki toplam verinin %5'ini aşmaması vb. koşullar ve kurallar dikkate alınarak, aylık ortalama hava sıcaklığı ve toplam yağış eğilimlerinin istatistiksel çözümlenmesi ve anlamlılık sınavı için 138 istasyonun verileri kullanıldı (Türkeş, 1996; Türkeş, 1998; Türkeş, 1999). Ortalama maksimum ve ortalama minimum hava sıcaklığı dizilerindeki eğilimlerinin belirlenmesi içinse, ayrıntılı türdeşlik ve rasgelelik çözümlenmeleri sonucunda Türkeş ve ark. (2002) tarafından belirlenen Türkiye'deki en uzun sıcaklık gözlemlerine sahip 70 istasyonun zaman dizileri kullanıldı. Analizler tüm verilerin mevsimlik ve yıllık dizileri için yapılmasına karşın, burada ortalama hava sıcaklığı ve yağış toplamaları için

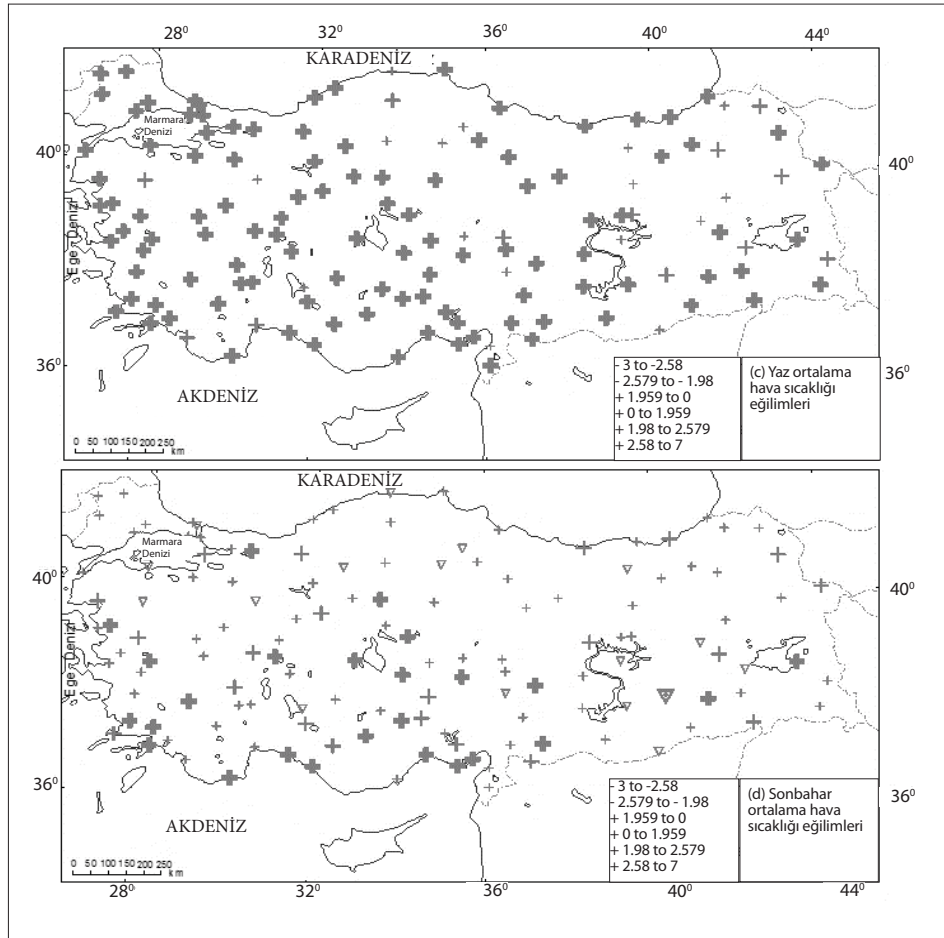
yıllık ve mevsimlik M-K sonuçları, ortalama maksimum ve ortalama minimum hava sıcaklıkları içinse yalnız yıllık M-K sonuçları verildi.

1.2.1 Hava sıcaklıklarında gözlenen değişimler ve eğilimler

Türkiye'nin mevsimlik ortalama hava sıcaklıklarındaki uzun süreli eğilimler incelendiğinde, kış mevsiminde bir bölümü istatistiksel açıdan anlamlı olmak üzere, hem artış hem de azalış eğilimleri görülür (Şekil 5-1a). *Mann-Kendall sınamasının* sonuçlarına göre, istatistiksel açıdan anlamlı (önemli) ısınma eğilimleri genel olarak Akdeniz Bölgesi'nde egemendir. Çok azı istatistiksel açıdan anlamlı olmak üzere, soğuma eğilimleri Karadeniz Bölgesi ile iç ve batı bölgelerinde görülür. İlkbahar ortalama hava sıcaklıkları, birkaç istasyon dışında, Türkiye'nin çok büyük bölümünde artma eğilimi gösterir (Şekil 5-1b). Özellikle Marmara, Ege, Akdeniz, İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde gözlenen ısınma eğilimleri, istatistiksel açıdan önemlidir.

Isınma eğilimleri, kentleşmenin hızlı ve yaygın, buna bağlı kentsel ısı adası etkilerinin kuvvetli olduğu İstanbul yöresinde, Ege ve Akdeniz bölgelerinin kıyı istasyonlarında ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi istasyonlarında çoğunlukla %1 anlamlılık düzeyinde önemli ve klimatolojik olarak dikkat çekicidir (Şekil 5-1b).

Burada sonuçları verilen yeni çalışmanın, Türkiye için gerçekleştirilen önceki hava sıcaklığı eğilim çalışmalarından en önemli farkı, ısınma eğilimlerinin giderek daha da kuvvetlendiği yaz ve sonbahar mevsimlerinde görülmesidir (Şekil 5-2c ve 5-2d). Yaz mevsiminde gözlenen kuvvetli ısınma eğilimleri, istasyonların büyük çoğunluğunda istatistiksel olarak %1 anlamlılık düzeyinde anlamlıdır (Şekil 5-2c). Bu durum bölgesel iklim değişikliği sinyallerinin kuvvetlenmesi açısından önemli ve üzerinde durulması gereken bir sonuçtur. Zaman dizisi çözümlmelerine göre, gözlenen ısınma eğilimi, kentleşme düzeyi ne olursa olsun neredeyse tüm istasyonlarda

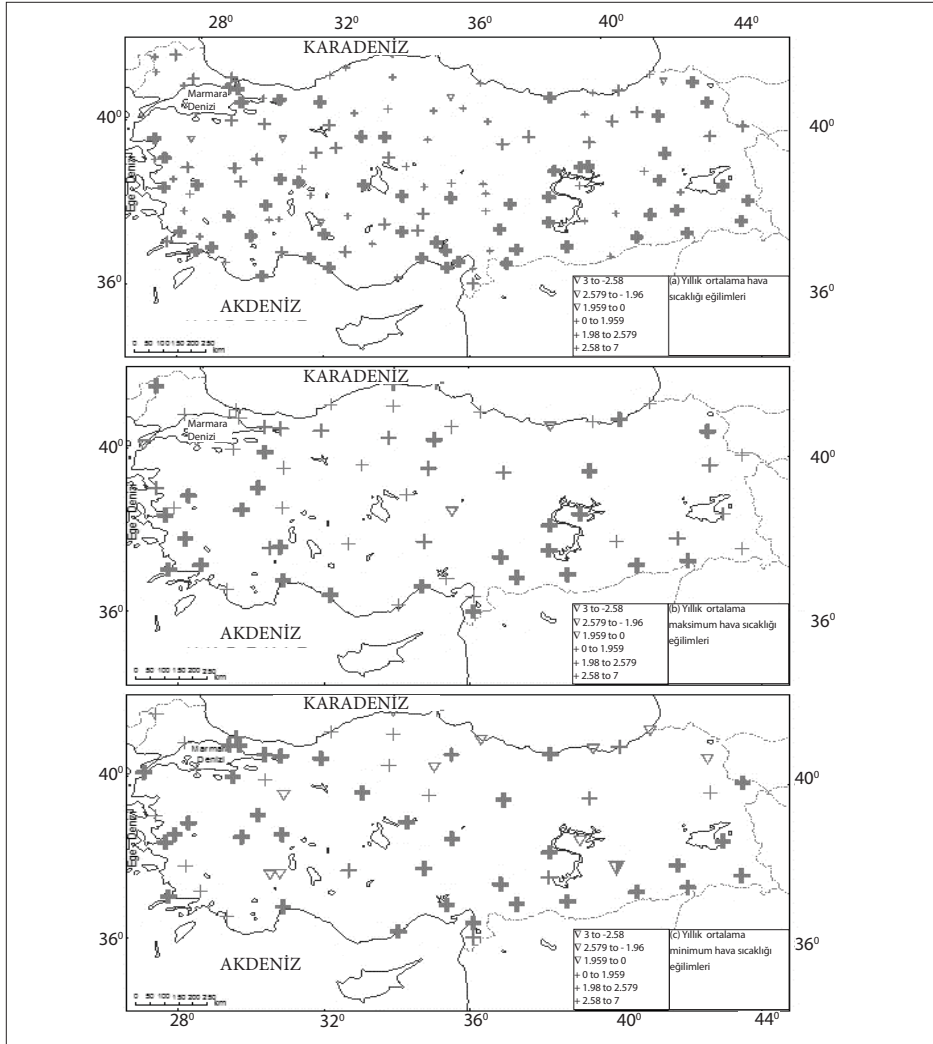


Şekil 5-2. M-K sıra ilişki katsayısı anlamlılık sınamasına göre, Türkiye yaz (c) ve sonbahar (d) mevsimi ortalama hava sıcaklığı dizilerindeki uzun süreli eğilimlerin alansal dağılım desenleri (Türkeş, 2016). Harita açıklaması Şekil 5-1'deki ile aynıdır

1980'li yıllarla birlikte hızlanmış ve önemli bir sıçrayla birlikte yaklaşık son 20 yılda önemli bir sıcak döneme dönüşmüştür (zaman dizisi çizimleri burada verilmedi). Uzun süreli ortalamaya göre daha sıcak koşulların egemen olduğu bir döneme geçiş (iklim değişikliği sinyali), bazı istasyonlarda 1980'li yılların ortasında, bazılarındaysa 1990'ların başında gerçekleşmiştir. Sonbahar ortalama hava sıcaklıkları da, çoğunlukla ısınma eğilimi gösterir (Şekil 5-2d). Birkaç istasyonda gözlenen soğuma eğilimi yalnız bir istasyonda istatistiksel açıdan önemliken, gözlenen ısınma eğilimleri, Ege, Akdeniz ve İç Anadolu bölgelerinde çoğunluğu %1 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak önemlidir.

Yıllık ortalama, yıllık ortalama maksimum ve yıllık ortalama minimum hava sıcaklıklarında da, mevsimlik

hava sıcaklıklarında belirlendiği gibi (mevsimlik çözümlene sonuçlarının tümü burada verilmedi), Türkiye için yapılan önceki gözlenen sıcaklık eğilimleri çalışmalarının sonuçlarına göre ısınmanın giderek daha da kuvvetlendiği görülür (Şekil 6a, 6b ve 6c). Yıllık ortalama, yıllık ortalama maksimum ve yıllık ortalama minimum hava sıcaklıklarında, rastgele bir dağılışı gösteren azalma eğilimiyle nitelenen birkaç istasyon dışında, istasyonların çoğunluğunda belirgin bir ısınma eğilimi görülür. Gözlenen ısınma eğilimi, çoğu istasyonda istatistiksel açıdan önemlidir. Zayıf ısınma ve soğuma eğilimleri, genel olarak Karadeniz Bölgesi ile İç ve Doğu Anadolu bölgelerinin kuzey bölümlerine dağılmış durumdadır. İstatistiksel açıdan anlamlı ısınma sinyalleriyse, çok belirgin bir alansal tutarlılık deseni gösterir. Tüm bu sonuçlar, ötekilerin yanı sıra, insan kaynaklı



Şekil 6. M-K sıra ilişki katsayısı anlamlılık sınavına göre, Türkiye yıllık ortalama (a), yıllık ortalama maksimum (b) ve yıllık ortalama minimum (c) hava sıcaklıklarındaki uzun süreli eğilimlerin alansal dağılışı desenleri (Türkeş, 2016). Harita açıklaması Şekil 5-1'deki ile aynıdır

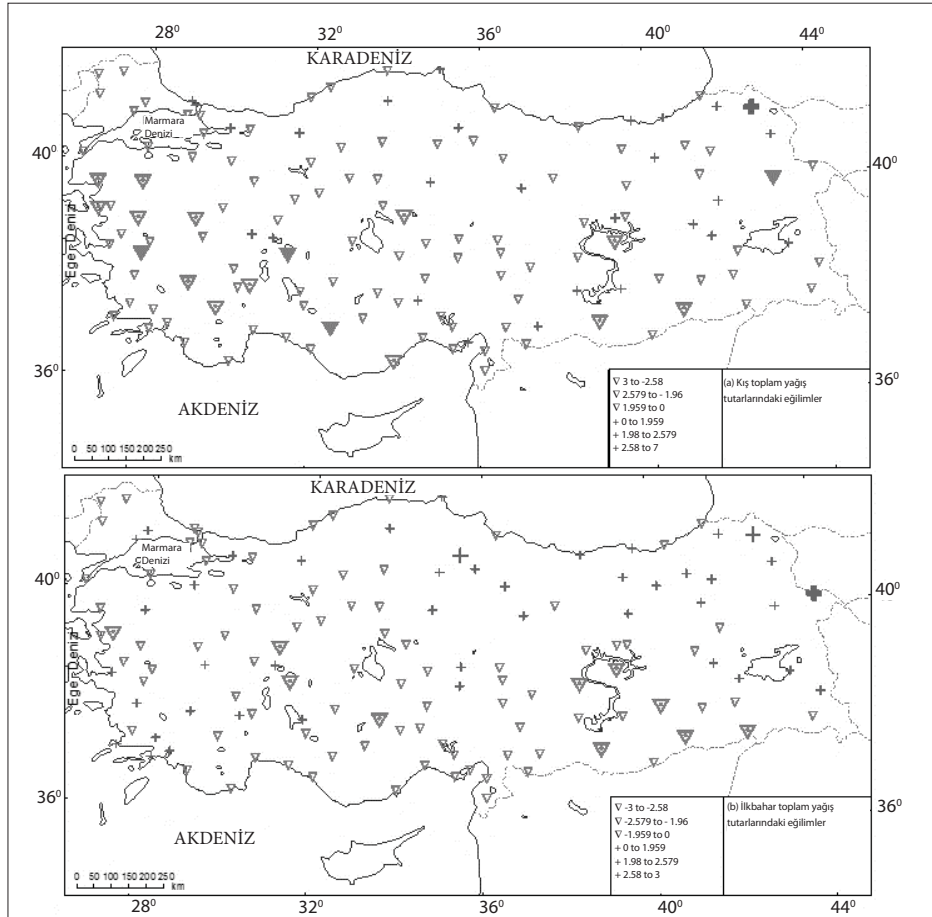
küresel iklim değişikliğinin en belirgin ve görece kolay belirlenen sonuçlarından birisi olan küresel ısınmanın Türkiye’de etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

1.2.2 Yağış toplamalarında gözlenen değişimler ve eğilimler

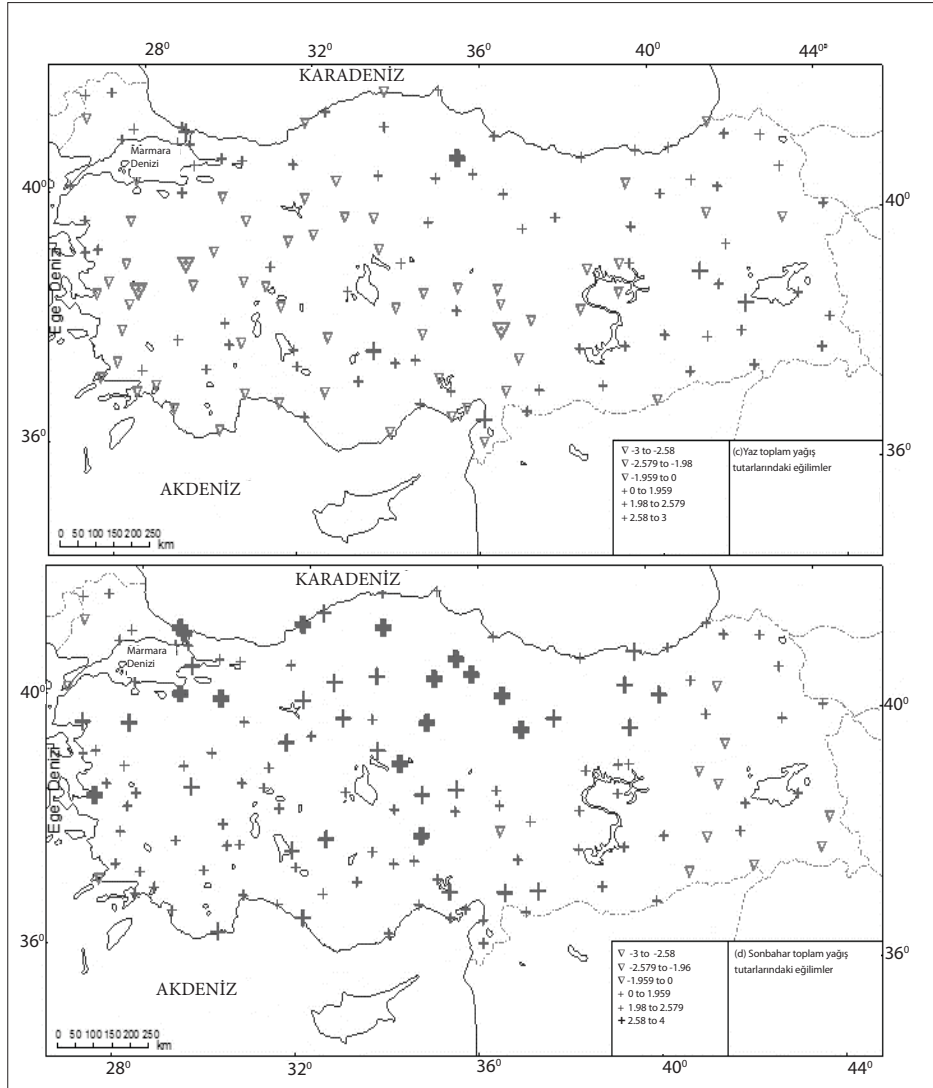
Konuyla ilgili literatür incelendiğinde, çok kurak ile yarınemli arasındaki iklim kuşaklarının, iklimdeki kuvvetli değişmelerin etkilerine karşı daha açık olduğu anlaşılır. Bölgesel yağıştaki kısa süreli değişimler ve uzun dönemli dalgalanmalar, kurak ve yarıkurak arazilerin bilinen bir özelliğidir. Örneğin, Afrika’nın Sahra ve Sahel bölgelerindeki yağış tutarı, 1960’lı yıllardan başlayarak önemli ölçüde azalmıştır. Benzer kurak dönemler son jeolojik devirde (Kuvaterner) ve tarihsel geçmişte de oluşmasına karşın, Sahra’daki bu son kurak dönemin anakarasal ölçekteki bir kuraklığa daha fazla eğilimli

olduğu kaydedilmiştir. Yağışlardaki uzun süreli azalma eğilimleri ve belirgin kurak koşullar, özellikle 1970’lerin başından başlayarak, subtropikal kuşağın ve Türkiye’yi de içerecek bir biçimde Akdeniz Havzası’nın önemli bir bölümünde de etkili olmuştur (Türkeş, 2008b; Türkeş, 2013b; Türkeş, 2014a; Türkeş, 2014b).

Gerçekte, bir karşılaştırma yapılırsa, Türkiye’de gözlenen mevsimlik ve yıllık yağış eğilimlerinin (bkz. Şekil 7-1, 7-2 ve 8), hava sıcaklıklarında gözlenen eğilimler kadar kuvvetli olmadığı görülür. Dünyanın birçok bölgesinde olduğu gibi, yağışlardaki değişimler uzun süreli eğilimlerden çok, çeşitli değişim ve dalgalanma biçimleriyle birlikte kurak ve nemli (yağış) dönemlerin sıklıklarında ve büyüklüklerinde belirlenen önemli değişiklikler biçiminde olmaktadır (Tatlı ve Türkeş, 2008; Tatlı ve Türkeş, 2011; Trenberth ve ark.,



Şekil 7. 1. M-K sıra ilişki katsayısı anlamlılık sınavına göre, Türkiye kış (a) ve ilkbahar mevsimi toplam yağış tutarlarındaki uzun süreli eğilimlerin alansal dağılım desenleri (Türkeş, 2016). Ters üçgen simgeleri, toplam yağış dizilerindeki azalma ya da kuraklaşma eğilimlerini gösterirken, artı simgeleri toplam yağış dizilerindeki artma ya da daha yağışlı (nemli) olma eğilimlerini gösterir. İçi noktalı ve dolu daha iri üçgen simgeler (görece kalın ve daha kalın artı simgeler), M-K u(t) sınavı örneklem değerlerine karşılık gelen harita simgelerini içeren lejanta göre, sırasıyla dizilerdeki %5 ve %1 anlamlılık düzeyindeki azalma (artma) eğilimlerini gösterir



2007; Trigo ve ark., 2006; Türkeş, 1996; Türkeş, 1998, Türkeş, 2011a, Türkeş, 2011b; Türkeş, 2013b; Türkeş ve Erlat, 2003; Türkeş ve Erlat, 2005; Türkeş ve Tatlı, 2009; Türkeş ve ark., 2009a ve Türkeş ve ark., 2009b). Yağış değişmelerinin alansal değişkenliği de kuvvetlidir. Sözü edilen bu kuraklaşma eğiliminden Türkiye'de en fazla, Ege, Akdeniz, Marmara, İç ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri etkilenmiştir.

Türkiye yağışlarındaki uzun süreli eğilimler ve değişimler incelendiğinde, genel olarak kış ve ilkbahar yağış toplamalarında Türkiye'nin Akdeniz yağış rejiminin egemen olduğu Marmara, Ege, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri ile İç ve Doğu Anadolu bölgelerinin iç ve güney bölümlerinde belirgin

bir azalma eğiliminin (kuraklaşma) olduğu görülür (Şekil 7-1a ve 7-1b). Kış mevsiminde Ege, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde gözlenen kuraklaşma eğilimlerinin bazıları istatistiksel olarak önemlidir (Şekil 7-1a). Bu sonuç Türkiye için daha önce yapılan yağış eğilimleri ve değişimlerine ilişkin çalışmalarla genel olarak uyumludur. Başka bir deyişle, kış mevsiminde Türkiye'nin özellikle batı, güney ve karasal iç-güney bölgelerinde gözlenen kuraklaşma eğilimi, yaklaşık olarak bu bölgelerde son 2 yılda (2008/2009-2009/2010) egemen olan ortalamadan daha yağışlı (nemli) koşulların varlığına karşın sürmektedir (Türkeş 2014b).

Yazın, önceki çalışmaların sonuçlarına benzer olarak, birkaçı istatistiksel olarak önemli olmak üzere,

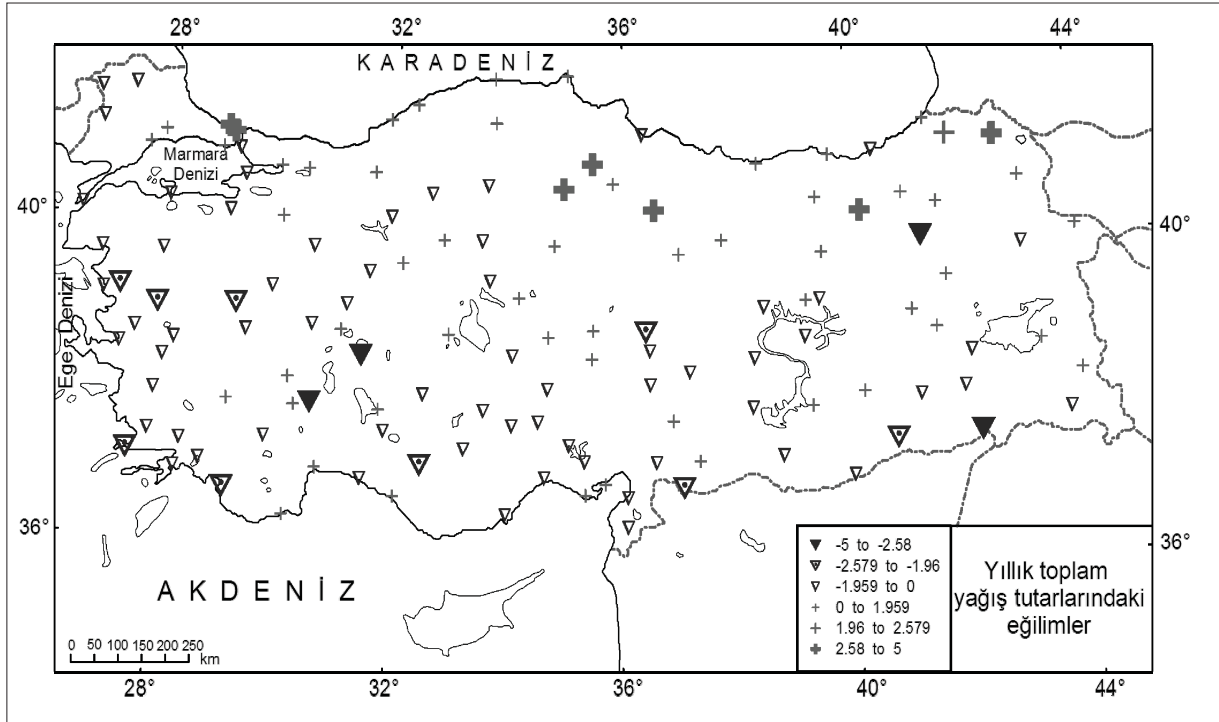
hem artış hem de azalış eğilimleri egemendir (Şekil 7-2c). Sonbaharda ise, önceki çalışmalardan ayrı olarak, daha önce gözlenen artış eğilimlerinin kuvvetlendiği ve artış eğilimi gösteren istasyon sayısının arttığı görülür. Sonbaharda, Türkiye'nin güneydoğu köşesini kaplayan bir alan dışında yağışlarda artış egemendir. Gözlenen artış eğilimleri, İç Anadolu'da, Batı Karadeniz Bölümü'nde, Güney Marmara ve Kuzey Ege bölümlerinde çoğu %1 anlamlılık düzeyinde olmak üzere, istatistiksel olarak önemlidir (Şekil 7-2d.). Bu artış eğilimlerinin ortaya çıkmasında, *Azorlar bölgesi üzerindeki subtropikal yüksek basınç ile Grönland ve İzlanda üzerindeki orta enlem alçak basınç arasındaki geniş ölçekli atmosfer basıncı dalgalanması* olarak tanımlanan Kuzey Atlantik Salınımı'nın (NAO) negatif evresiyle bağlantılı olarak son yıllarda gözlenen uzun süreli ortalamadan daha nemli koşullar etkili olmuş olabilir (Türkeş, 2011a; Türkeş, 2012a).

Türkiye'deki yıllık toplam yağışlardaysa, temel olarak kış ve sonbahar yağışlarındaki eğilim ve değişimlerin beklenen bir yansıması olarak, Türkiye'nin Akdeniz yağış rejiminin egemen olduğu batı ve güney bölgelerinde bir azalma eğilimi görülür (Şekil 8). Öte yandan, Trakya'nın Tekirdağ ve İstanbul yöreleri ve Karadeniz Bölgesi ile İç ve Doğu Anadolu bölgelerinin kuzey ve doğu bölümlerinde yıllık toplam yağışlarda bir artma eğilimi egemendir. Gözlenen artış ve azalış

eğilimlerinin ancak birkaçı istatistiksel olarak önemlidir.

Dünya Meteoroloji Örgütü'ne (WMO) göre, "bir yılın toplam yağışı bir alanın (ülke, bölge, bölüm, yöre, havza, vb.) yarısından (%50) fazlasında en az ardışık 2 yıl süresince uzun süreli ortalama (en az 30 yıllık) ya da normal yağış (genellikle 30 yıllık) tutarının %60'ından düşük olduğu zaman bir alanın kuraklıktan etkilendiği" kabul edilir. Bu tanıma ve çeşitli kuraklık belirleme/izleme yöntemlerine dayalı çalışmaların sonuçlarına göre, Türkiye'de İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinin bazı bölümlerinde 2012 yılında başlayan, 2013'te çok daha geniş bir alanda etkili olarak devam eden ve 2013 yaz kuraklığı ile de birleşerek şiddetlenen bir kuraklık (meteorolojik olarak başlayan ve giderek çeşitli bölgelerde ve çeşitli sistemler açısından tarımsal ve hidrolojik kuraklıklara dönüşmüş olan), 2014 yılının ilk yarısında da Türkiye'nin önemli bir bölümünde etkili olmuştur (Türkeş 2014b; Türkeş ve Yıldız, 2014).

Son 40 yılda özellikle kış mevsimindeki ve yıllık yağış değişiklikleri dikkate alındığında, Türkiye'deki kuraklık olaylarının en şiddetli ve geniş yayımlı olanları, 1971-1974, 1983-1984, 1989-1990 ve 2007-2008 dönemleri ile 1996 ve 2001 yıllarında oluşmuştur (Tatlı ve Türkeş, 2008; Türkeş, 1996, 1998, 1999, 2008b



Şekil 8. M-K sıra ilişki katsayısı anlamlılık sınavına göre, Türkiye yıllık toplam yağış tutarlarındaki uzun süreli eğilimlerin alansal dağılımı desenleri (Türkeş, 2016). Harita açıklaması Şekil 5-1'dekinin aynısıdır

ve 2011a; Türkeş ve Erlat, 2003 ve 2005; Türkeş ve Tatlı, 2009; Türkeş ve ark., 2009a ve 2009b). Türkiye'nin büyük bölümünde etkili ve şiddetli su açığının ve yetersizliğinin yaşanmasına yol açan 2007-2008 kuraklığının ardından, 2009-2011 döneminde genel olarak uzun süreli ortalamadan ya da normal yağıştan daha nemli/yağışlı koşullar (yağışlı ya da ıslak devre) egemen olmuştur (Türkeş, 2012b; Türkeş, 2013b; Türkeş, 2014a; Türkeş, 2014b). Ancak, 2012 yılında karasal İç Anadolu ve Doğu Anadolu'nun bazı bölümlerinde yeniden etkili olmaya başlayan meteorolojik kuraklıklar, yaz kuraklığıyla birleşerek, 2013 yılının Türkiye'nin büyük bölümünde, özellikle karasal İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgeleri ile Orta ve Doğu Akdeniz, Doğu Marmara ve Orta Karadeniz bölümlerinde ortadan olağanüstü kurağa kadar değişen şiddette kurak geçmesine yol açmıştır. Sonuç olarak, 01 Ekim 2013 – 17 Ocak 2014 tarihleri arasında Türkiye geneli için hesaplanan kümülatif yağış tutarında, uzun yıllar ortalamasına göre %37.0 ve 2013 yılına göre de %47.4 oranında azalma gerçekleşti (Türkeş ve Yıldız, 2014). 2013-2014 kuraklığı, 6 ay ve daha uzun zaman ölçekleri için hesaplanan Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI) dağılım desenlerine bakıldığında açıkça görüleceği gibi, bir meteorolojik kuraklık olayı olmaktan çıkarak birçok bölgede ve yörede tarımsal ve hidrolojik kuraklıklara dönüşmüştür (Türkeş, 2014a; Türkeş, 2014b).

1.2.3 Ekstrem hava ve iklim olaylarında gözlenen değişimler ve eğilimler

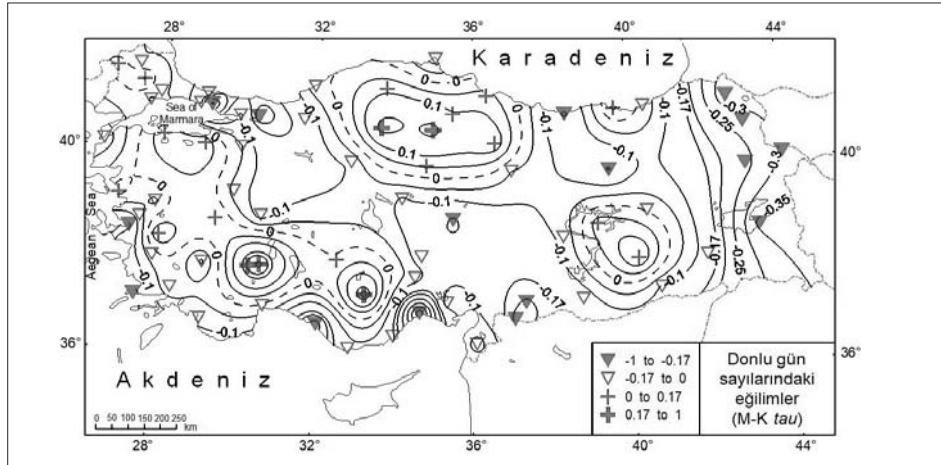
Uzun süreli klimatolojik ve meteorolojik gözlemlerden elde edilen yeni bulgular, 1950'lerden beri bazı ekstremlerde özellikle günlük ekstrem hava sıcaklıklarında (ör. en yüksek ve en düşük sıcaklıklar, tropikal ve yaz günleri, vb.), donlu gün sayılarında ve sıcak hava dalgalarının sıklığı ve uzunluğunda da önemli değişiklikler ortaya çıktığını göstermektedir. IPCC (2013)'ye göre de, "Birçok aşırı hava ve iklim olaylarında 1950'den beri değişiklikler olduğu gözlenmiştir. Küresel ölçekte, yüksek olasılıkla soğuk gün ve gecelerin sayıları azalmış, sıcak gün ve gecelerin sayısı artmıştır. Avrupa, Asya ve Avustralya'nın geniş bölgelerinde sıcak hava dalgalarının sıklığı olasılıkla artmıştır." Bu tür değişiklikler, genel olarak Doğu Akdeniz ve Türkiye'de, özellikle 1990'lı yıllarla birlikte donlu ve kar yağışlı günlerin belirgin bir şekilde azalması; önemli bir bölümü istatistiksel olarak anlamlı olmak üzere, sıcak günlerin ve gecelerin sayıları ile gece en düşük ve gündüz en yüksek hava sıcaklıklarının artması; gündüz en yüksek-gece en düşük sıcaklık farklarının azalması şeklinde

kendisini hissettirmiştir (Erlat ve Türkeş, 2008; Erlat ve Türkeş, 2012; Erlat ve Türkeş, 2013; Türkeş ve ark., 2002; Türkeş ve Sümer, 2004; Kartum ve ark., 2011). Başka bir deyişle, Türkiye'de yaklaşık son 25 yıllık dönemde, hem sıcaklık rejimi belirgin olarak daha ılıman ve sıcak koşullara doğru değişmiş, hem de sıcak hava dalgalarının sıklığında ve şiddetinde önemli değişimler gerçekleşmiştir (Türkeş, 2008b; Türkeş, 2012a; Türkeş, 2013b).

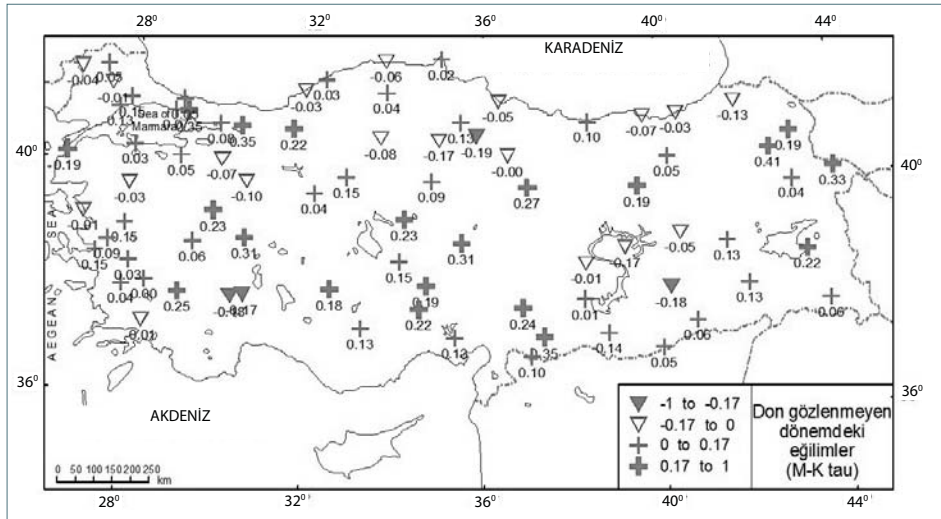
Bunlara ek olarak, sonraki bölümde görüleceği gibi, sera gazlarının atmosferik birikimlerindeki artışların, yüzey sıcaklıkları, alt troposfer hava sıcaklıkları, buharlaşma, bulut, yağış ve nem gibi değişkenlerde bölgesel ve küresel değişikliklere yol açması beklenmektedir. Türkiye'de ve onu çevreleyen bölgeler için gelecek iklim ve iklim değişkenliğine ilişkin küresel ve bölgesel iklim model benzeştirmelerinin kestirimleri, Türkiye'de genel olarak yağmur ve kar yağışlarının azalması, hava sıcaklıklarının, buharlaşmanın, sıcak hava dalgalarının ve kuraklık olaylarının sıklığı ve uzunluğunun artması vb. önemli iklimsel değişimlerin olacağını ve Akdeniz havzasındaki birçok ülke ile birlikte gelecekte Türkiye'nin de iklim değişikliğinden olumsuz etkileneceğini gösterir (örn. IPCC, 2007; IPCC, 2013; Türkeş, 2012a; Türkeş, 2013b; Türkeş, 2014a). Tüm bu nedenlerle, iklim değişikliğinin etkilerini önlemek ya da en azından azaltabilmek ve ona uyum açısından, Türkiye'nin gelecekteki ikliminin öngörülmesi yaşamsal bir önem taşır.

Ekstrem (aşırı) hava/iklim olayları, iklim sisteminin kendi doğal değişkenlik ve kaotik özellikleriyle bağlantılıdır. Bir hava ve iklim olayının "aşırı" olarak tanımlanabilmesi için, bazı önemli meteorolojik değişkenlerin istatistiksel dağılıma göre gözlenen değer aralığının üst (ya da alt) uçlarının yakınında yer alması ya da mevcut olan yüksek eşik değerinin üzerinde bir aşamaya ulaşması gerekir. İstatistiksel olarak "nadir" tanımına girmemesine karşın, ekosistemler ya da toplum üzerinde büyük oranda olumsuz etki yaratan hava ya da iklim olayları da aşırı olarak kabul edilmektedir (Türkeş ve Erlat, 2018).

Aşırı hava ve iklim olayları sık oluşmamakla birlikte başta tarım ve gıda güvenliği gibi sektörler olmak üzere ekonomik koşullar ve insan sağlığı üzerinde büyük etkilere sahiptir. Ağırlıklı olarak kentler ve kıyılarda yoğunlaşan ve giderek artan nüfus, daha karmaşık hâle gelen alt yapı tesisleri, geçmişe göre günümüzde toplumların aşırı hava/iklim olaylardan olumsuz etkilenme potansiyelini de arttırmaktadır (Türkeş ve Erlat, 2018).



Şekil 9. 1949/1950-2009/2010 döneminde kaydedilen yıllık donlu gün sayılarındaki uzun süreli doğrusal olmayan eğilimleri saptamak için hesaplanan Mann-Kendall (M-K) sıra ilişkisi katsayısı tau'nun (t) Türkiye üzerindeki coğrafi dağılışı deseni (Erlat ve Türkeş, 2012). Burada ters üçgenler negatif (azalma) ve artı simgeler pozitif (artış) eğilimlerini gösterir. İçi dolu üçgenler ve kalın artı işaretleri ise, %5 anlamlılık düzeyinde anlamlı eğilimlere karşılık gelir



Şekil 10. 1950-2013 döneminde don gözlenmeyen dönemin (FFP) uzunluğundaki uzun süreli doğrusal olmayan eğilimleri saptamak için hesaplanan Mann-Kendall (M-K) sıra ilişkisi katsayısı tau'nun (t) Türkiye üzerindeki coğrafi dağılışı deseni (Erlat ve Türkeş, 2016). Burada ters üçgenler negatif (azalma) ve artı simgeler pozitif (artış) eğilimlerini gösterir. İçi dolu üçgenler ve kalın artı işaretleri ise, %5 anlamlılık düzeyinde anlamlı eğilimlere karşılık gelir

Aşırı hava ve iklim olayları oluşum şekillerine göre iki şekilde sınıflandırılabilir. Buna göre bir aşırı olay, yağış ve rüzgâr hızı gibi tek bir meteorolojik değişkenin belirlenen mutlak ya da persantile dayanan eşik değerleri ya da tekrarlanma sıklığındaki özel eşik değerleri geçmesi ile gerçekleşir. Örneğin sıcak ve soğuk hava dalgaları o bölge için geçerli olan sıcaklıklardaki eşik değerlerin geçilmesi ile oluşur. Bazı aşırı hava/iklim olayları ise birden çok hava ve iklim olayının aynı zamanda gerçekleşerek oluşturdukları etkilerin birbirini şiddetlendirmesi ile gerçekleşir. Şöyle ki, belli bir

dönemde yağışın ortalamasının altında kalması aşırı bir iklim olayı değildir, ancak yağış yetersizliği ile aşırı sıcaklıkların bir araya gelmesi, aşırı bir iklim olayı olan kuraklığa dönüşmesine yol açabilir.

1.2.3.1 Yıllık donlu gün sayılarındaki değişimler

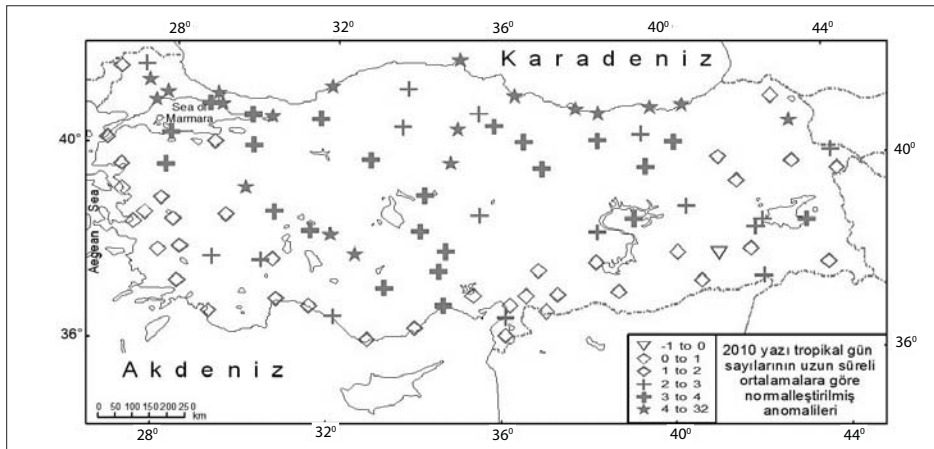
Ortalama, ortalama maksimum ve minimum hava sıcaklıklarında gözlenen artışlarla bağlantılı olarak, Türkiye'de don olayı, yaz ve tropik gün sayıları gibi ekstrem hava ve iklim olaylarının şiddet, sıklık ve

süreleri de değişmiştir. Örneğin Türkiye’de 1950 ile 2010 yılları arasındaki dönemde yıllık don olaylı gün sayıları başta Doğu Anadolu, Marmara ve Akdeniz kıyılarındaki istasyonlarda olmak üzere azalma eğilimi gösterirken, İç Anadolu’nun kuzey ve güneybatı bölümleri ile Akdeniz Göller Yöresi’nde artış eğilimi sergilemiştir (Erlat ve Türkeş, 2012). Ardahan, Iğdır ve Van gibi istasyonlarda azalma eğilimi her on yıl için 4 güne yaklaşmıştır. Ortalama, ortalama maksimum ve minimum, yaz ve tropikal, tropikal gece hava sıcaklıkları ve rekor hava sıcaklıklarında gözlenen Türkiye ölçeğindeki alansal olarak tutarlı benzer eğilimlerin tersine (örneğin kuvvetli ısınma ya da artış eğilimleri vb. gibi), donlu gün sayılarında

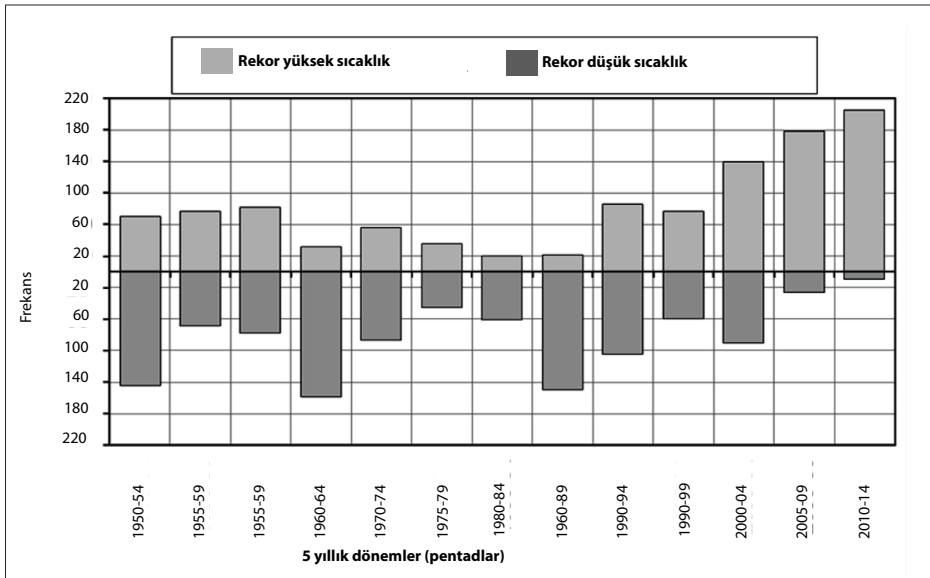
gözlenen bu iki farklı (artış ve azalış) eğilimin varlığı, don olaylarının oluşumunda mikroklimatolojik ve yöresel fiziki coğrafya koşullarının (ör. don çanakları, derin vadiler, bitki örtüsü yoğunluğu, bakı vb.) önemli bir rol üstlenmesiyle açıklanabilir (Şekil 9).

1.2.3.2 Don olayı gözlenmeyen dönemin uzunluğundaki değişimler

Türkiye’de 20. yüzyılın ikinci yarısıyla birlikte, don olaylarının başlama ve sona erme tarihlerinde de önemli bir değişim gözlenmektedir. 1950-2013 döneminde sonbaharın ilk don olayları 0.71 gün/on yıl olmak üzere daha ileri bir tarihe kayarken, ilkbaharın son don olayları her on yıl için 0.64 gün



Şekil 11. 2010 yılı yaz mevsimi tropikal gün sayılarının 1961-1990 normal döneminin ortalamasına göre hesaplanan yıllık normalleştirilmiş anomalilerin Türkiye üzerindeki coğrafi dağılışı (Erlat ve Türkeş, 2013). En kuvvetli ve kuvvetli anomaliler, sırasıyla kalın artı ve içi dolu yıldız simgesi ile gösterilmiştir



Şekil 12. 1950-2014 döneminde Türkiye’deki 81 istasyonda gözlenen rekor maksimum ve rekor minimum hava sıcaklığı olaylarının yıllık sayılarının pentadlara göre değişimi (Türkeş ve Erlat, 2018)

olmak üzere daha erken bir tarihte son bulma eğilimi göstermiştir (**Erlat ve Türkeş, 2016**). Söz konusu belirgin değişikliklerin doğal bir sonucu olarak, Türkiye'nin büyük bir bölümünde don olaylarının gözlenmediği (FFP) dönemin uzunluğunda da istatistiksel açıdan anlamlı bir artış gerçekleşmiştir (Şekil 10).

1.2.3.3 Yaz ve tropikal gün sayılarındaki değişimler

1950-2010 döneminde Türkiye'de yaz (≥ 25 °C) ve tropikal gün ≥ 30 °C) sayılarındaki değişimin incelendiğinde, alansal ve zamansal olarak farklılıklar bulunduğu gözlenir. Yaz ve tropikal gün sayıları 1950-1975 döneminde hafif bir azalma eğilimi, 1975 sonrası değerlerde belirgin bir artış eğilimi göstermiştir. Türkiye'de yaz ve tropikal gün sayıları açısından en dikkat çekici yıl 2010'dur. Bu yılda, başta Kuzeydoğu Anadolu bölümü olmak üzere Türkiye'de incelenen istasyonların yaklaşık yarısında yaz ve tropikal (Şekil 11) gün sayıları 1961-1990 ortalamasının 3 standart sapma değeri üzerine çıkmıştır (**Erlat ve Türkeş, 2013**).

Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) İklim Komisyonu tarafından önerilen 27 iklim indisine göre Türkiye'de ekstrem iklim olayları incelendiğinde, birçoğu %5 düzeyinde anlamlı olmak üzere yaz, sıcak gün ve gece ile tropikal gece sayılarının 1960-2010 döneminde artış, don olaylı gün, serin gün ve serin gece sayılarının ise azalma eğilimi gösterdiği görülür. Türkiye'de yaz mevsiminde günlük maksimum sıcaklıklarda 90. persantile ölçütüne göre sıcak gün ve sıcak dalgaları incelendiğinde, 1965-2006 yılları

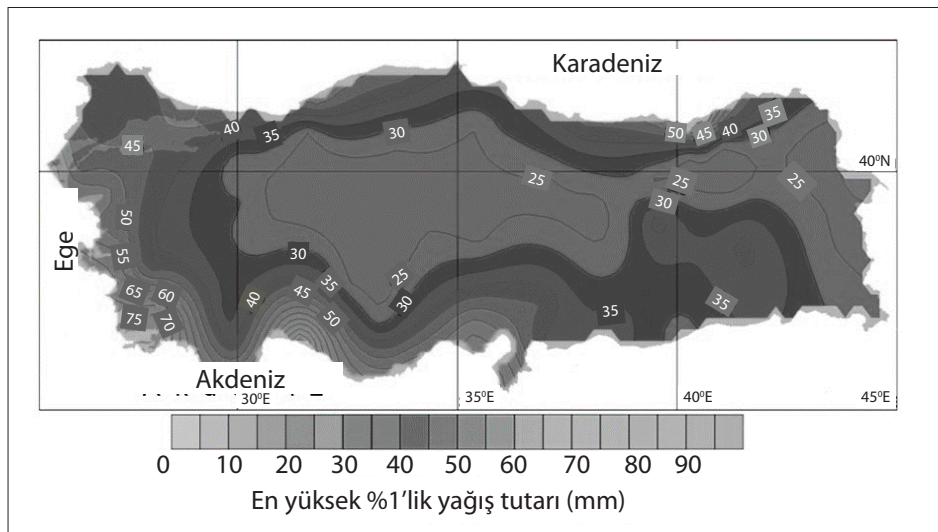
arasında Türkiye'nin batısında sıcak gün sayıları ve sıcak dalgalarının süresinin arttığı, bu artışın 1998 sonrası belirginleştiği gözlenir. Ayrıca bu dönemde sıcak dalgalarının sayısı ile Akdeniz'de deniz yüzeyi sıcaklıkları ve orman yangınları arasında kuvvetli bir ilişki bulunduğu söylenebilir (**Erlat ve Türkeş, 2013**).

1.2.3.4 Rekor maksimum ve rekor minimum hava sıcaklıklarındaki değişimler

Türkiye'de 1950-2014 döneminde kaydedilen rekor maksimum ve minimum hava sıcaklıklarının yıllık sayılarındaki zamansal değişimler incelendiğinde, rekor minimum hava sıcaklığı frekansının 1950'li yıllardan günümüze doğru azaldığı görülmektedir. Buna karşın özellikle 2000'li yıllarla birlikte rekor maksimum hava sıcaklığı frekansında ise bir artış eğilimi olup, 1950 yılından bu yana rekor maksimum sıcaklık olaylarının yarısı 2000-2014 döneminde kaydedilmiştir (Şekil 12). Çalışmada kullanılan 81 istasyonda en yüksek sıcaklık değerleri 2000 yılında, en düşük sıcaklıklar ise 1950 yılında kaydedilmiştir (**Erlat ve Türkeş, 2015**). Rekor maksimum hava sıcaklıklarının frekansının arttığı son yıllarda, çoğunlukla kuvvetlenmiş ve uzun dönemli güney sektörlü yüzey ve sınır katmanı rüzgârları ile asıl olarak 850 hPa jeopotansiyel yükseklik düzeyinde gelişen güney sektörlü sıcak hava adveksiyonları gözlenmektedir (**Türkeş ve Erlat, 2018**).

1.2.3.5 Son yağıştan sonra gerçekleşen en uzun yağışsız gün sayılarındaki değişimler

Türkiye'de ekstrem yağışların oluşumunu sağlayan Avrupa ve Akdeniz Havzası'ndaki atmosfer



Şekil 13. Türkiye'deki günlük yağış toplamlarına göre, en yüksek %1'lik günlük yağış eşiklerinin (mm) Türkiye üzerindeki alansal dağılışı (Lolis ve Türkeş, 2016)

dolaşımı karakteristiklerinin çözümlendiği bir çalışmada, 1979-2011 döneminde Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün (MGM) 70 istasyonunda kaydedilen günlük yağış toplamlarının en üst (yüksek) %5 ve %1 yüzde birliklerine dayanan bir kriter kullanılarak, Türkiye'deki günlük aşırı yağışların klimatolojik ve meteorolojik özellikleri ayrıntısıyla incelenmiştir. Günlük yağış verilerinin en yüksek %1'lik yağış eşiklerinin (mm) Türkiye üzerindeki alansal dağılışı desenleri Şekil 13'de gösterilmiştir (**Lolis ve Türkes, 2016**). Bu dağılışı desenine göre, günlük en üst ya da en yüksek %1'lik yağış eşik değerleri (40 mm'nin üstü) Türkiye'nin kıyı kuşağında, özellikle de Güneybatı Anadolu, Batı Akdeniz ve Doğu Karadeniz'in kıyı kuşağı ve ardındaki dağlık alanlarda görülür. Düşük değerler ise, deniz etkisinden uzak karasal iç ve doğu bölgelerde egemendir.

Türkiye'deki - MGM'nin 1970-2011 dönemi günlük yağış verilerine dayanarak- kuraklıkların alansal ve zamansal klimatolojik ve istatistiksel karakteristiklerini ortaya çıkarmaya yönelik yeni bir çalışmada, belirli bir bölgedeki kurak olma özelliğini (İng: *dryness*) nitelemeye yönelik görece yeni bir yaklaşım olan "son yağış olayından sonra gerçekleşen en uzun yağışsız/kuru günler (DDSLR)" kullanılmıştır. Bir yerdeki DDSLR, şiddet, tutarlılık ve kuraklıkların yıl içi ve yıllararası değişimlerini ortaya koyan *zamansal belirsizlik* olarak belirlenen 3 farklı ölçü kullanılarak değerlendirilmektedir. Sözü edilen çalışmada, DDSLR, yağış mevsimselliğinin bir ölçüsü olan Akdeniz İklim İndisi (MCI) yaklaşımıyla birlikte ele alınmıştır. Sonuç olarak, DDSLR'ye ilişkin üç ölçü, Türkiye'nin nemli Akdeniz kıyı bölgesi ile zaten yarıkurak bir iklimin egemen

olduğu Suriye ve Irak sınırları boyunca en yüksek değerleri göstermiştir. Bu bölgelerdeki kuraklık indisleri, daha az yıllık yağış alan karasal İç Anadolu Bölgesi'nden daha büyüktür. Kuraklığın en az ya da en zayıf olduğu alanlarsa, Türkiye'nin nemli ılıman ve her mevsim yağışlı tipik bir orta enlem iklimin egemen olduğu Karadeniz kıyı kuşağı boyuncadır. Kuraklaşmanın bir ölçüsü olan DDSLR'deki artışlar (kuraklaşmanın kuvvetlenmesi) ise, Türkiye'nin yaklaşık olarak batı yarısında ve özellikle kuzeybatı bölümlerinde daha belirgindir (Şekil 14).

1.2.3.6 Türkiye hortum klimatolojisi ve gözlenen değişimler

Son yıllarda ve aylarda yaşanan ani ve şiddetli hava olayları, Marmara Bölgesi'nin çeşitli yerlerinde (İstanbul, Çanakkale, Bandırma yörelerinde) ve Akdeniz Bölgesi'nin kıyı kuşağında özellikle Antalya Körfezi'nde oluşan şiddetli gök gürültülü fırtınalar, hortum olayları, ceviz büyüklüğündeki dolular, şiddetli yağış olaylarının artması, bazı bölgelerdeyse genel olarak yağış tutarlarının azalması ve kuraklık olayların nedenleri ve küresel iklim değişikliği ile bağlantıları vb. gibi çok sayıda yeni ve önemli konuyla karşı karşıya olduğumuzun açık göstergeleridir.

Uygun yüzey ve yüksek atmosfer koşullarında tam gelişme olanağı bulan şiddetli bir gökgürültülü fırtına, özellikle bir ya da birden fazla hortumla birlikte geliştiğinde, kara üzerinde çok yıkıcı ve afet boyutunda hava koşulları oluşturabilir. Hortumların, son yıllarda aralarında Türkiye'nin de yer aldığı ABD dışındaki ülkelerde daha fazla ilgi görmesi, oluşum



Şekil 14. Türkiye'de DDSLR sayılarındaki doğrusal eğilimler (Kutiel ve Türkes, 2017)

sıklıklarındaki değişimler kadar, şiddet ve etkilerindeki artış ya da kuvvetlenme ile küresel iklim değişikliği, özellikle yüzey (kara ve deniz) ve alt atmosfer (troposfer) sıcaklıklarının ve buharlaşmanın (özellikle denizler ve okyanuslardan) artışı arasında yakın bir bağlantı kurulmasıdır. Kuramsal olarak ve bazı iklim model çalışmalarına göre, yüzey ve alt atmosfer sıcaklıklarının, buharlaşmanın ve atmosferin su buharı içeriğinin (örn. su buharı karışma oranı ya da özgül nemin) artması sonucunda, konvektif kararsızlık ya da konveksiyon artabilecektir (**Türkeş, 2015a; Türkeş, 2015b**). Bunun sonucunda, özellikle daha fazla yoğunlaşma gizli ısısının açığa çıkması, hava kütlesi orajlarının (olağan gökgürültülü fırtına) ve süper hücre fırtınalarının şiddetlerinin ve hortum oluşturma kapasitelerinin kuvvetlenmesi beklenebilir (**Türkeş, 2015b; Türkeş, 2017**). Şiddetli gökgürültülü fırtına ve hortum sıklıklarının değişmesi konusu ise, oluşumları farklı düzenekler ile çeşitli fiziki coğrafya öge ve etmenlerine de bağlı olduğu için, henüz daha az kesinlikle öngörülebilir bir aşamadır.

Daha önceki çeşitli çalışma ve açıklamalarımızda (örn. Türkeş, 2015a, 2017; www.hurriyetdailynews.com/climate-scientist-warns-of-possible-increase-in-number-of-whirlwinds-in-turkey-117179; www.artigercek.com/yazarlar/pelincengiz/iklim-degisir-akdeniz-olmaz-akdeniz-de-hortum-olur-firtina-olur..., vb.) gelecekte de en fazla hortum (su hortumu ve hortum) olayının oluşabileceği yerlerden

biri olarak tanımladığımız Güneybatı Anadolu, Batı Akdeniz Bölümü ve özellikle de Antalya Körfezi, "Türkiye Hortum Klimatolojisi" haritasında açıkça görüldüğü gibi, Türkiye'nin hortum olaylarının en çok gözlemlendiği coğrafi alana karşılık geliyor (Şekil 15). Kuşkusuz, hortumların Akdeniz Bölgesi'nde, özellikle Antalya Körfezi'nde daha sık ve daha etkili olmasının kendine özgü bazı önemli fiziki coğrafi ve meteorolojik nedenleri vardır. Bir su hortumunun ya da hortumun oluşabilmesi için, mutlaka iyi gelişmiş (çok etkin) bir gökgürültülü fırtına yani bir kümülönimbüs (Cb) bulutunun ya da birleşik bir Cb kütlesinin ya da bazı çok şiddetli hortumlarda orta ölçekli bir siklonun (mezo siklon) varlığı gereklidir. Hortumlar, bir soğuk cephenin önünde, bir sağanak çizgisi ya da kararsızlık alanında + çok nemli ve kararsız sıcak havanın içinde oluşabilir. Antalya Körfezi ve benzeri coğrafyalarda, bunlara ek olarak, deniz etkisi ve orografik zorlama hortum oluşumunu çok yakından denetler ya da tetikler.

Son yıllarda özellikle son on yıllık dönemde hemen her etkili (çeşitli hasar, can ve mal kayıplarına neden olan) hortum olayından sonra, "Türkiye'de giderek daha fazla hortum olayı oluşmakta" olduğuna ilişkin çeşitli görüşler ve açıklamalar, yazılı, sözlü ve sosyal medyada yer almaktadır. Acaba bu tür açıklamaların bilimsel bir kanıtı ya da desteği var mıdır? Bu soruyu belirli bir güven düzeyinde doğru olarak yanıtlayabilmek için, Türkiye'de gerçekleşen hortum olaylarının alansal ve zamansal



Şekil 15. Türkiye'de oluşan hortum olaylarının alansal dağılışı deseni. Harita, 1 Ocak 2000 – 19 Şubat 2019 döneminde gözlenen, rapor edilen ya da çeşitli haber kaynaklarından Şiddetli Hava Avrupa'nın elde ettiği ve doğrulamasını yaptığı bilgi ve verilere dayanarak hazırlandı (<http://www.severe-weather.eu/>)

değişimlerini incelemek gerekir. Bunun için yapılması gereken en doğru yaklaşım ise, hortum olayı sıklıklarına ilişkin zaman dizisi verilerinin alansal ve zamansal değişmelerinin istatistiksel çözümleridir.

Henüz Türkiye’de bu tür ayrıntılı klimatolojik ve istatistiksel çözümlerini yapabilecek bir hortum veri tabanı ne yazık ki henüz yoktur. Bugünkü koşullarda, bu tür bir temel analiz ancak Şiddetli Hava Avrupa merkezinin tüm Akdeniz ve Avrupa ülkeleri için topladığı ve doğrulamasını yaptığı hortum olayları veri tabanından yararlanılarak yapılabilir (**Dotzek ve ark.,**

2009). Bu veri tabanına dayanarak gerçekleştirdiğimiz bir ilk çalışmada, başlangıç olarak, Türkiye’de 1 Ocak 2000 (00:00 GMT) – 31 Aralık 2009 (24:00 GMT) arasındaki 10 yıllık dönemde oluşan toplam hortum olayı sayıları ile 1 Ocak 2010 (00:00 GMT) – 19 Şubat 2019 (00:00 GMT) arasındaki yaklaşık 9 yıl 20 günlük dönemde oluşan toplam hortum olayı sayılarının genel bir karşılaştırması yapıldı (Şekil 16). Şekil 23, geçen yaklaşık son 10 yıllık dönemde (Ocak 2010-Şubat 2019) gözlenen hortum sayısının, ondan önceki 10 yıllık dönemde (Ocak 2000-Aralık 2009) gerçekleşen hortum olayı sayılarından belirgin olarak daha fazla olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, son 10



(a) 1 Ocak 2000 (00:00 GMT) - 31 Aralık 2009 (24:00 GMT) arasındaki 10 yıllık dönemde Türkiye’de oluşan toplam hortum olayı sayılarının coğrafi dağılışı



(b) 1 Ocak 2010 (00:00 GMT) - 19 Şubat 2019 (00:00 GMT) arasındaki yaklaşık 9 yıllık dönemde Türkiye’de oluşan toplam hortum olayı sayılarının coğrafi dağılışı

Şekil 16. Şiddetli Hava Avrupa’nın elde ettiği ve doğrulamasını yaptığı bilgi ve verilerle dayanarak hazırlandı (<http://www.severe-weather.eu/>)

yıllık dönemde hortum olaylarının sıklığında önceki yıllara göre belirgin bir artış söz konusudur. Şekil 23 incelendiğinde, başka bir dikkat çekici durumun varlığı da göze çarpmaktadır. Bu ise asıl olarak son 10 yıllık dönemde daha önce hiç hortum olayı kaydı olmayan Doğu Karadeniz ve Kuzeydoğu Anadolu bölümlerinde artık hortum olaylarının oluşmakta oluşudur.

Tüm bu olanlar hem iklimin tüm alan ve zaman ölçeklerindeki kendi değişkenliğinin ve insanın küresel iklim sistemi üzerindeki olumsuz etkilerinin, hem de insanın yerel ve bölgesel iklimler, jeomorfoloji (eğim, eğimin şekli, yamaç ve toprak kararlılığı, vb.), bitki örtüsü, etkili yağış (buharlaşma-terleme, toprağa sızma ve yüzey akışı arasındaki denge), hidroloji ve hidrolojik ağ deseni (sıklığı, biçimi, rölyef enerjisi, vb.) üzerindeki olumsuz etkilerinin sonuçlarıdır.

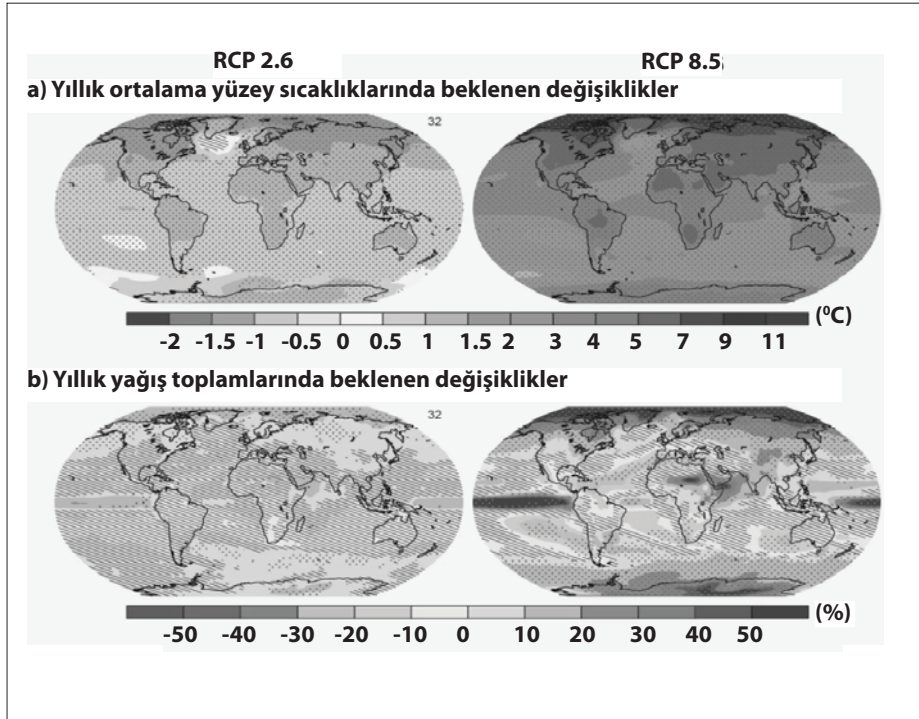
Nedeni ne olursa olsun, günümüzde küresel ya da bölgesel iklim değişikliklerinin (yüzey ve alt atmosfer sıcaklıklarının ve buharlaşmanın artması vb.) sonuçlarını görüyor ve bunlarla bağlantılı şiddetli sel, taşkın, hortum, heyelan, tropikal ve orta enlem siklonik fırtınaları gibi aşırı hava ve iklim olayları ve afetlerinin etkilerini yaşıyoruz.

Ayrıca, buraya kadar ele aldığımız çok sayıda örnek, birçok etkisine ve olumsuz sonuçlarına ek olarak ister küresel ister bölgesel ölçekte olsun, iklim değişikliği aşırı (uç) hava ve iklim olaylarının sıklığında, şiddetinde, alansal dağılışında, uzunluğunda ve zamanlamasında değişikliklere yol açtığını göstermektedir.

Model çalışmaları da gelecekte iklimimizin dünyanın birçok bölgesinde yüksek olasılıkla daha fazla değişken (oynak) olacağını gösteriyor. Değişkenliğin artması ise, özellikle Akdeniz Havzası ve Türkiye'nin büyük bölümünde, daha fazla ve şiddetli yağış, gök gürültülü fırtına ve hortum olayı, daha fazla ve şiddetli sel, taşkın ve kütle hareketi, daha fazla ve şiddetli sıcak hava dalgası (örn. **Kuglitsch ve ark., 2010, Türkeş ve Erhat, 2018**), kuraklık ve orman yangını ile karşı karşıya kalacağımız anlamına geliyor. Daha açık söylemek gerekirse, gelecekte Türkiye ve bölgesinde, iklim 'normallerinden' ya da uzun süreli ortalamalarından daha kuvvetli ve daha sık sapma eğiliminde olan daha değişken ve aşırılıkları daha kuvvetli bir iklimimiz olması beklenmelidir.

2. Model benzetimi küresel ve bölgesel iklim değişiklikleri

Hızla gelişen iklim modelleri, gözlenen kıtasal ölçekli yüzey sıcaklığı desenlerini ve onlarca yıllık zaman



Şekil 17. Şekil 17: Yeni IPCC senaryolarına (RCP2.6 ve RCP8.5) dayanarak; (a) Yıllık ortalama yüzey sıcaklığı (°C olarak) ve (b) yıllık yağış toplamlarında (% olarak) 1986-2005 ortalamasına göre 2081-2100 döneminde gerçekleşmesi beklenen model kestirimi değişiklikler (IPCC, 2013)

ölçeklerindeki eğilimleri, 20'nci yüzyılın ortalarından beri gözlenmiş olan daha hızlı ısınma eğilimini ve büyük volkanik püskürmelerden hemen sonra ortaya çıkan soğumayı yeniden üretmektedir. İnsan etkisi, atmosfer ve okyanus ısınmasında, küresel su döngüsündeki değişikliklerde, kar ve buzdaki azalmalarda, küresel ortalama deniz düzeyi yükselmesinde ve bazı aşırı iklim olaylarındaki değişikliklerde saptanmıştır. İnsan etkisi çok yüksek olasılıkla 20'nci yüzyılın ortasından beri gözlenen ısınmanın en önemli nedeni olmuştur (IPCC, 2013).

2.1 Küresel iklim değişikliği kestirimleri

IPCC'ye (2013) göre, sera gazlarının sürmekte olan salımları, daha fazla ısınmaya (Şekil 17a) ve başta buharlaşma ve yağış (Şekil 17b) gelmek üzere iklim sisteminin tüm bileşenlerinde değişikliklere neden olacaktır. İklim değişikliğinin sınırlandırılması, sera gazı salımlarının önemli ve sürekli azaltılmasını gerektirecektir. IPCC 2013'teki yeni senaryolara (Temsili Konsantrasyon Yolu - RCP) dayalı öngörülen iklim değişikliği, senaryo farklılıkları hesaba katıldıktan sonra, hem desenler hem de büyüklük açısından bir önceki IPCC Raporu'ndakine (2007) benzemektedir. Küresel yüzey sıcaklığı değişikliği, 21'nci yüzyılın sonuna kadar, biri (RCP2.6) dışında tüm yeni IPCC senaryolarına (RCP'ler) dayanarak *olasılıkla* 1850 - 1900 dönemine göre 1.5 °C'yi ve iki yeni senaryoya (RCP6.0 ve RCP8.5) göre *olasılıkla* 2 °C'yi aşacaktır. Küresel ısınma, 2100 yılı sonrasında da sürecektir. Küresel ısınma ve yağış değişimleri, yıllararası değişkenlikten on yıllık değişkenliklere kadar çeşitli değişkenlikler sergilemeyi sürdürecektir ve bölgesel olarak türdeş olmayacaktır (Şekil 17a ve 17b).

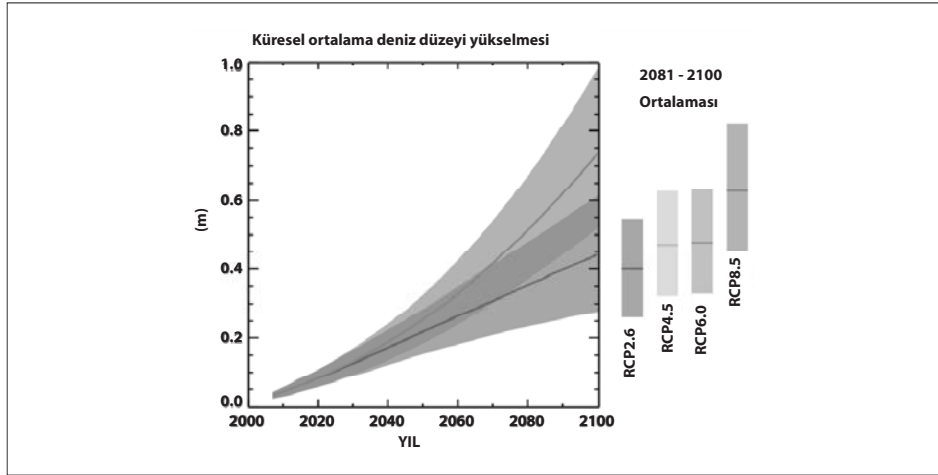
Okyanuslar, 21'nci yüzyıl boyunca da ısınmalarını sürdürecektir. Yüzeyle biriken ısı enerjisi, derin okyanusa doğru geçecek ve okyanus dolaşımını etkileyecektir. Arktik deniz buz örtüsü *olasılıkla* azalmaya ve incelmeye devam edecek ve Kuzey Yarımküre ilkbahar kar örtüsü, küresel ortalama yüzey sıcaklığı yükseldikçe, 21'nci yüzyıl boyunca azalacaktır. Küresel ortalama deniz düzeyi 21'nci yüzyıl boyunca yükselmesini sürdürecektir (Şekil 18). Tüm IPCC senaryoları, deniz düzeyi yükselmesinin oranının, artan okyanus ısınması ve buzullar/buz kalkanlarından artan kütle kaybı nedeniyle, *yüksek olasılıkla*, 1971-2010 döneminde gözlenen yükselmeyi geçeceğini göstermektedir. Dahası, iklim değişikliği, atmosferdeki CO₂'nin artışını daha da büyütürken, karbon döngüsü süreçlerini etkileyecektir. Karbonun okyanuslar tarafından daha fazla biriktirilmesiyle, okyanus asitliğinin artmasına yol açacaktır.

Son olarak, küresel iklim değişikliğinin pek çok özelliğinin ve etkisinin, CO₂ ve diğer sera gazı salımları durdurulsa bile yüzyıllarca süreceğini hatırlatmakta yarar görüyorum. Ayrıca bu olgu, insan kaynaklı sera gazlarının geçmiş, günümüz ve gelecek salımlarının neden olduğu yüzyıllarca sürecektir önemli bir iklim değişikliği yükümlülüğünün (ör. BM Kyoto Protokolü ve sonrası) de varlığını sürdüreceğini göstermektedir.

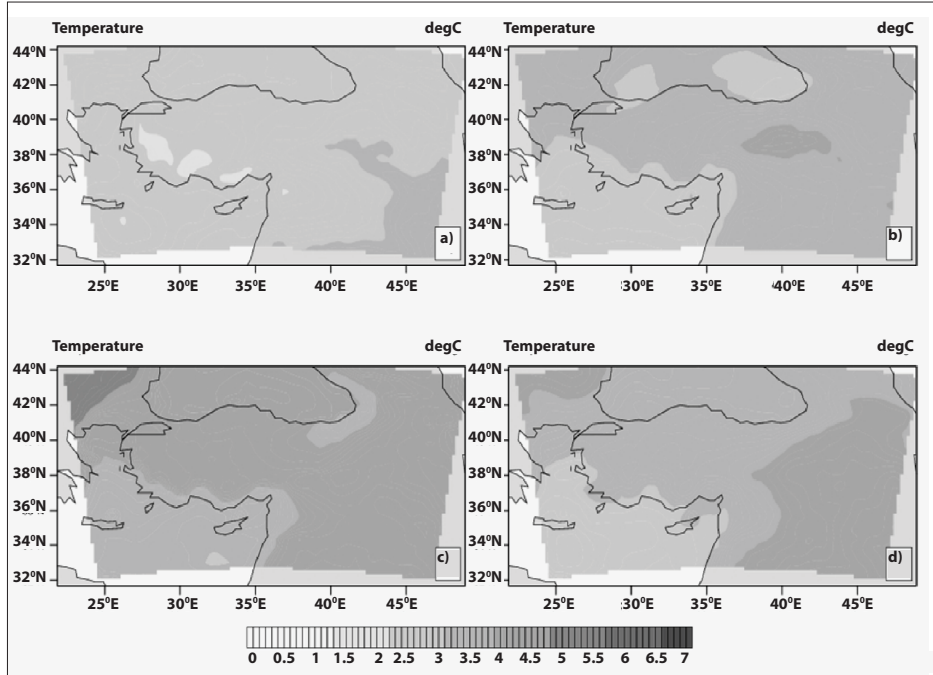
2.2 Türkiye ve bölgesi için iklim değişikliği kestirimleri

Türkiye'de ve onu çevreleyen bölgelerde (genel olarak Balkanları ve Orta Doğu Bölgesini içeren Doğu Akdeniz Havzası) gözlenen iklim değişikliği ve değişkenliğine ilişkin çalışmalar ile küresel ve bölgesel iklim modellerinin benzeştirmeleri ve kestirimleri, Türkiye'de önemli iklimsel değişimlerin olduğunu ve Akdeniz havzasındaki birçok ülke ile birlikte gelecekte Türkiye'nin de iklim değişikliğinden olumsuz etkileneceğini gösterir (IPCC, 2007; IPCC, 2013; Trigo ve ark., 2006; Türkeş, 1996; Türkeş, 1998; Türkeş, 1999; Türkeş, 2008b; Türkeş, 2012a; Türkeş ve Sümer, 2004; Türkeş ve Tatlı, 2009; Türkeş ve ark., 2002; Türkeş ve ark., 2009a; Türkeş ve ark., 2009b; Türkeş ve ark., 2011; Turp ve ark., 2014; Öztürk ve ark., 2015). Tüm bu nedenlerle, iklim değişikliğinin etkilerini önlemek ya da en azından azaltabilmek ve ona uyum açısından, Türkiye'nin gelecekteki ikliminin öngörülmesi yaşamsal bir önem taşır. Tatlı ve Türkeş (2008, 2011), Önal ve Semazzi (2009), Altınsoy ve ark. (2012), Önal ve Unal (2014); Öztürk ve ark. (2012, 2013, 2015), Turp ve ark. (2014), Türkeş ve ark. (2011) ve Sen ve ark. (2012), Türkiye'nin gelecek iklimini ve iklimsel değişkenliklerini ortaya koymaya yönelik sınırlıdır bölgesel iklim modeli çalışmalarına örnek olarak verilebilir.

Bu bölüm, Öztürk ve ark. (2014)'nın günümüz iklimine (1970-2000) göre gelecek 2070-2100 dönemi için Türkiye'nin ortalama hava sıcaklığı ve yağış klimatolojilerindeki değişikliklerin bölgesel iklim modeli simülasyonları (benzetim) kullanılarak öngörüldüğü çalışmadan yararlanarak hazırlandı. Günümüz ve gelecek iklim koşullarının model kestirimlerinin yapılması için, International Centre for Theoretical Physics (ICTP) bölgesel iklim modeli RegCM4.3.5 kullanıldı. Met Office Hadley Merkezi'nin HadGEM2 küresel iklim modeli, Türkiye ve çevresi için alt ölçeklendirme yöntemi ile çalışıldı. Gelecekte Türkiye'nin iklim değişkenlerinde oluşacak değişimleri incelemek için,



Şekil 18. Şekil 18: 1986-2005 dönemine göre 21'nci yüzyıl boyunca küresel ortalama deniz düzeyi yükselmesi kestirimleri (IPCC, 2013). Tüm RCP senaryoları için 2081-2100 dönemi ortalamasına göre değerlendirilen olası değişim aralıkları, yatay bir çizgi olarak gösterilen ortanca değer ile birlikte dikine sütunlar şeklinde verilmiştir.

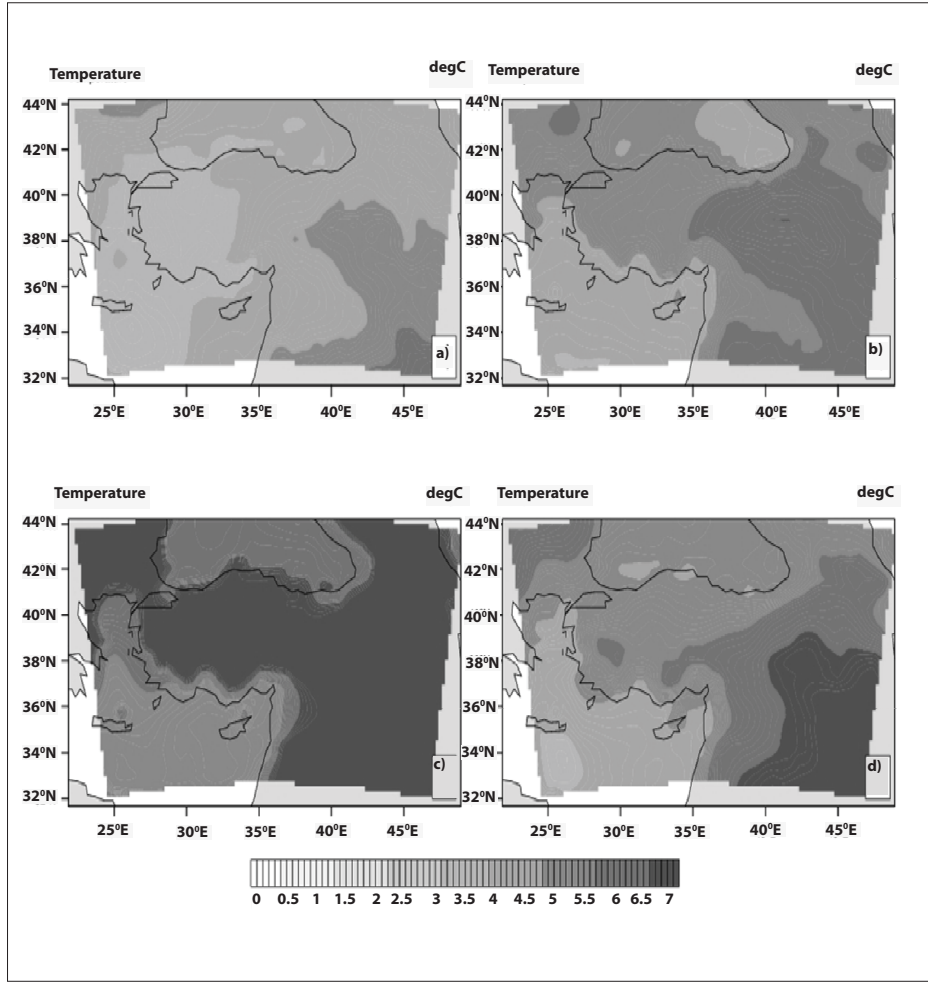


Şekil 19. Küresel iklim modeli HadGEM2 RCP4.5 salım senaryosu çıktıları kullanılarak bölgesel iklim modeli RegCM'in 1970-2000 referans dönemi klimatolojisine göre gelecek 2070-2100 dönemi (a) kış, (b) ilkbahar, (c) yaz ve (d) sonbahar mevsimleri için kestirilen ortalama hava sıcaklıklarındaki değişikliklerin Türkiye ve yakın çevresi üzerindeki coğrafi dağılış desenleri (Öztürk ve ark., 2014)

küresel iklim modelinin RCP4.5 ve RCP8.5 salım senaryoları çıktıları kullanıldı.

Kullanılan HadGEM2 iklim modeli ve RCP4.5 salım senaryosuna göre, Türkiye'de 2070-2100 yılları arasında yaz mevsimi hava sıcaklıklarının 1970-2000 klimatolojisine göre 4-6.5 °C arasında artması beklenmektedir. Ortalama hava sıcaklıklarındaki artışlar,

kış mevsimi için 3.5 °C dolaylarında seyrederken, ilkbahar ve sonbahar mevsiminde bu artışlar 4-4.5 °C'ye kadar çıkar (Şekil 19). HadGEM2 iklim modeli ve RCP8.5 salım senaryosuna göreyse, Türkiye'de 2070-2100 yılları arasında yaz mevsiminde kestirimi yapılan hava sıcaklıklarının 1970-2000 klimatolojisine göre 5.5-7 °C arasında değişen bir değerde artması beklenmektedir. Kış mevsimi için, ortalama hava



Şekil 20. Küresel iklim modeli HadGEM2 RCP8.5 salım senaryosu çıktıları kullanarak bölgesel iklim modeli RegCM'in 1970-2000 referans dönemi klimatolojisine göre gelecek 2070-2100 dönemi (a) kış, (b) ilkbahar, (c) yaz ve (d) sonbahar mevsimleri için kestirilen ortalama hava sıcaklıklarındaki değişikliklerin Türkiye ve yakın çevresi üzerindeki coğrafi dağılış desenleri (Öztürk ve ark., 2014)

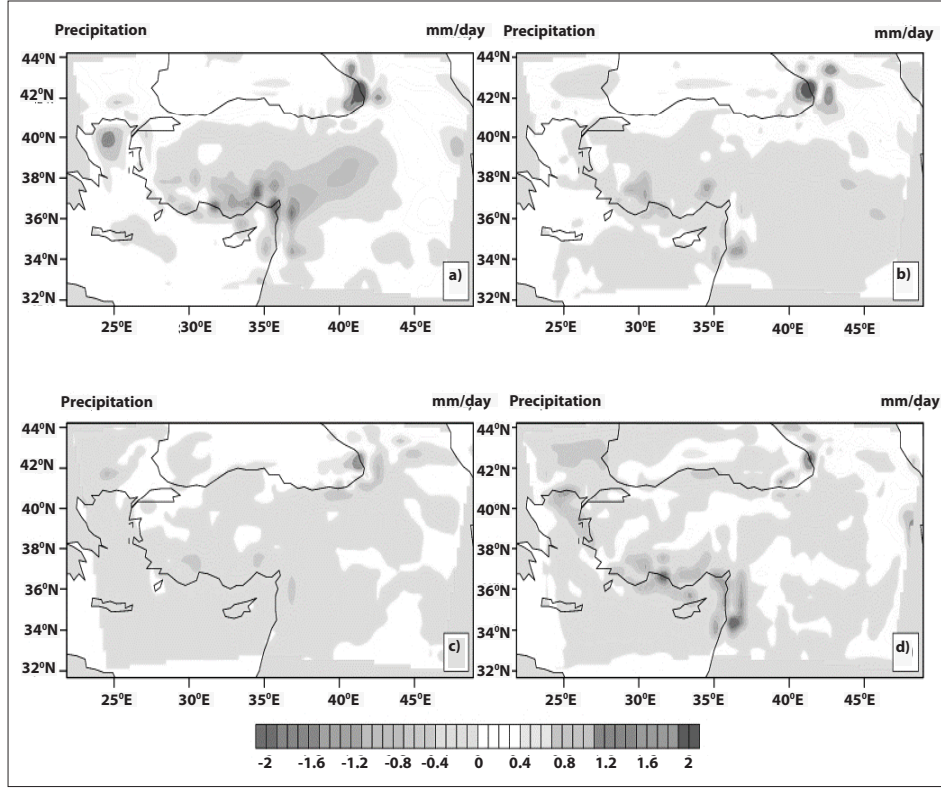
sıcaklıklarındaki artışının 4.5 °C dolayında olduğu, ilkbahar ve sonbahar mevsimleri için ise, doğuya gidildikçe artarak 5-7 °C arasında olduğu görülmektedir (Şekil 20).

Toplam yağış kestirimleri incelendiğinde, HadGEM2 iklim modeli ve RCP4.5 salım senaryosu kullanılarak yapılan benzeştirmede, Türkiye'de 2070-2100 yılları arasında 1970-2000 dönemi klimatolojisine göre yağış değişiminin kış mevsimi için ülkenin güneyinde 2 mm/gün kadar azalması (negatif sapma), kuzeydoğusunda ise 1.6 mm/gün artmasının (pozitif sapma) beklendiği görülür. Buna karşın, yaz mevsiminde yağışların negatif yönde çok az değişeceği, ilkbahar ve sonbaharda ise kış mevsimindeki eğilimin daha zayıf süreceği görülür (Şekil 21).

HadGEM2 iklim modeli ve RCP8.5 salım senaryosu kullanılarak yapılan benzeştirmeye dayalı gelecek kestirimleri, RCP4.5 salım senaryosu çıktılarındaki eğilimin hemen aynısını gösterir. Öte yandan, bölgenin güneyinde toplam yağışlarda azalma beklenirken, kuzeydoğusunda yağışların artması beklenir (Şekil 22).

3. Hükümetlerarası iklim değişikliği paneli 1.5 °C Küresel Isınma Özel Raporu'na genel bir bakış ve raporun ana çizgileri

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) 1.5 °C Küresel Isınma Özel Raporu (IPCC ÖR1.5°C ya da SR1.5°C), kısaca söylemek gerekirse, Sanayi öncesi düzeylerine göre 1.5 °C'lik küresel ısınmanın doğal ve insan sistemler ile ilişkili küresel sera gazı salım yolları üzerindeki etkilerini, iklim değişikliği tehdidine karşı gerekli olan küresel sera gazı salımları azaltımı (yanıt),



Şekil 21. Küresel iklim modeli HadGEM2 RCP4.5 salım senaryosu çıktıları kullanılarak bölgesel iklim modeli RegCM'in 1970-2000 referans dönemi klimatolojisine göre gelecek 2070-2100 dönemi (a) kış, (b) ilkbahar, (c) yaz ve (d) sonbahar mevsimleri için kestirilen toplam yağış tutarlarındaki değişikliklerin Türkiye ve yakın çevresi üzerindeki coğrafi dağılış desenleri (Öztürk ve ark., 2014).

sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğu ortadan kaldırma çabaları bağlamında ele almaktadır (IPCC, 2018; <https://www.ipcc.ch/sr15/>).

IPCC ÖR1.5°C tam raporu 5 ana bölümden oluşur (IPCC, 2018). Bunlar:

1. Bölüm - İnsan kaynaklı (antropojen) 1.5°C'lik küresel ısınmaya yönelik küresel çabaların kuvvetlendirilmesi;

2. Bölüm - 1.5 °C'lik Küresel Isınmanın Anlaşılması; Sürdürülebilir Kalkınma Bağlamında **1.5 °C sıcaklık artışı** ile uyumlu İklim Değişikliğiyle Savaşım Yolları;

3. Bölüm: Öngörülen 1.5 °C ve 2 °C'lik Küresel Isınmanın Doğal ve İnsan Sistemleri Üzerindeki Etkileri ve Bağlantılı Riskler;

4. Bölüm: 1.5 °C Düzeyindeki Küresel Isınma ile Uyumlu Salım Yolları ve Sistem Geçişleri; Küresel Çabaların

Kuvvetlendirilmesi ve Uygulanması; Sektörel değerlendirme ve Yollar ile Sosyal ve Ekonomik Geçiş ya da Dönüşüm Düzenek ve Yolları;

5. Bölüm: Sürdürülebilir Kalkınma, Yoksulluğun Ortadan Kaldırılması ve Eşitsizliğin Azaltılması.

3.1 Hükümetlerarası iklim değişikliği paneli (IPCC) 1.5 °C Küresel Isınma Özel Raporu'nun ana mesajları

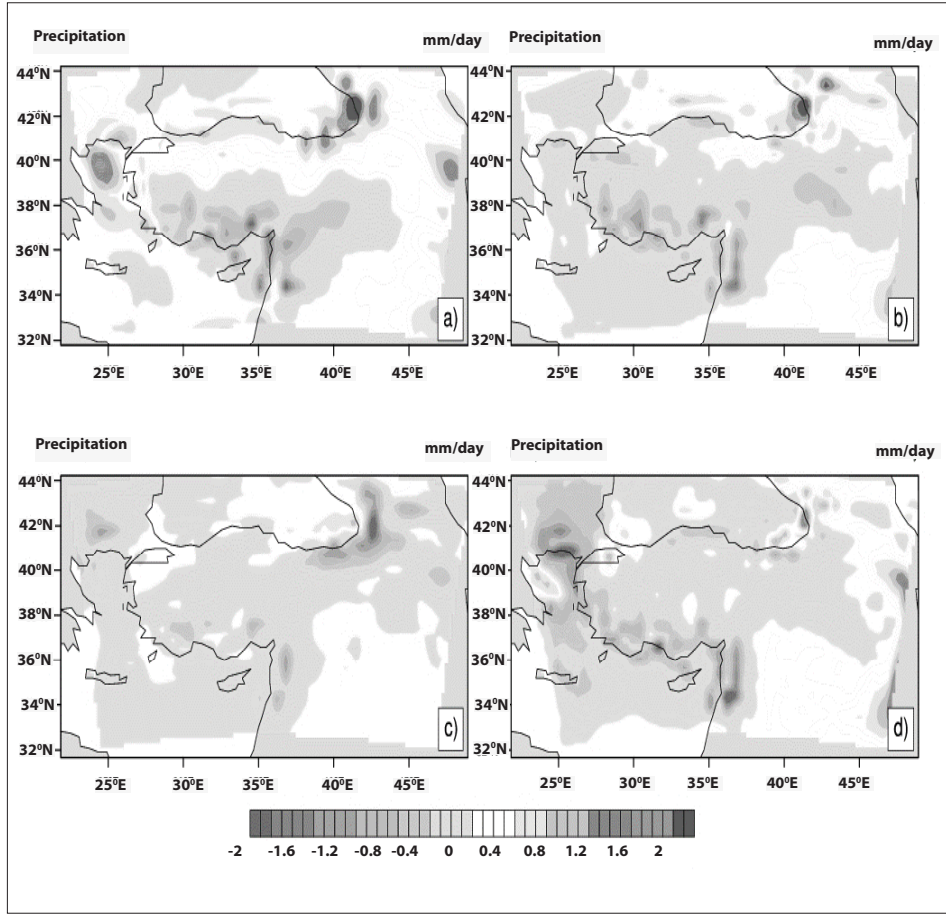
Özetlemek gerekirse, ÖR1.5°C bu konuyu 4 ana başlık altında ele almıştır (IPCC, 2018). Bunlar:

- 1.5 °C'lik Küresel Isınma Ne Anlama Gelmektedir: 1.5 °C'lik Küresel Isınmanın Anlaşılması;

- Öngörülen İklim Değişiklikleri, Potansiyel Etkiler ve Bağlantılı Riskler

- 1.5 °C ile Uyumlu Salım Yolları ve Sistem Geçişleri

- Sürdürülebilir Kalkınma ve Yoksulluğun Ortadan Kaldırılması Çabaları Bağlamındaki Küresel Yanıtların



Şekil 22. Küresel iklim modeli HadGEM2 RCP8.5 salım senaryosu çıktıları kullanılarak bölgesel iklim modeli RegCM'in 1970-2000 referans dönemi klimatolojisine göre gelecek 2070-2100 dönemi (a) kış, (b) ilkbahar, (c) yaz ve (d) sonbahar mevsimleri için kestirilen toplam yağış tutarlarındaki değişikliklerin Türkiye ve yakın çevresi üzerindeki coğrafi dağılım desenleri (Öztürk ve ark., 2014)

(Küresel Etkinlik, Çalışma ve Girişimlerin) Kuvvetlendirilmesi

3.1.1 Küresel ısınmanın anlaşılması

Konuyla ilgili önemli noktalar ÖR1.5°C'de şöyle özetlenmiştir (IPCC, 2018):

Küresel yıllık ortalama yüzey sıcaklıkları, fosil yakıt yakılması başta olmak üzere, insan etkinlikleri sonucunda sanayi öncesi döneme göre 1.0 °C artmıştır (0.8 °C – 1.2 °C güven aralığında) (Şekil 23).

Artış 2030-2052 arası dönemde 1.5 °C'ye ulaşacak (Şekil 23).

Sanayi devriminden bugüne antropojen salımlardan kaynaklanan sera gazı salımları atmosferde uzun yıllar boyunca (yüzyıldan binyıla kadar) kalarak, iklim sisteminde değişikliklere (ör. deniz seviyesi

yükselmesi, buzulların erimesi, vb.) neden olmaya devam edecek.

Doğal ve insan sistemleri üzerindeki iklim riskleri 1.5 °C'de şu ankiye göre daha yüksek, ancak 2 °C'den daha düşük olacaktır.

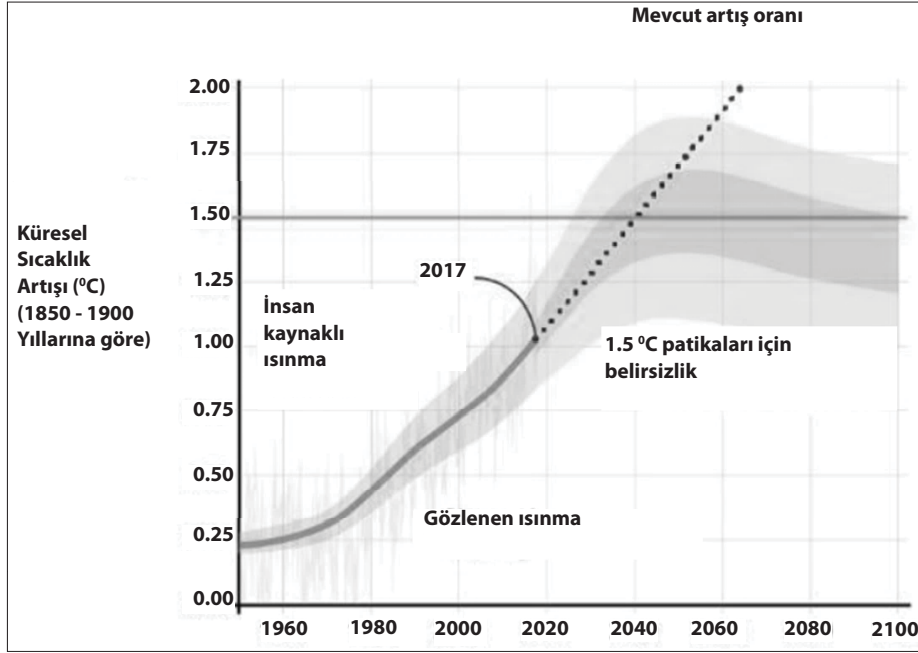
3.1.2 Öngörülen iklim değişiklikleri, potansiyel etkiler ve bağlantılı riskler

Öngörülen riskler hem ısınmanın büyüklüğüne, oranına, coğrafi bölgeye, gelişmişlik ve etkilenebilirlik düzeyine göre, hem de uyum ve savaşım (mitigasyon) yöntemlerinin uygulanma ve başarı derecesine göre değişecektir.

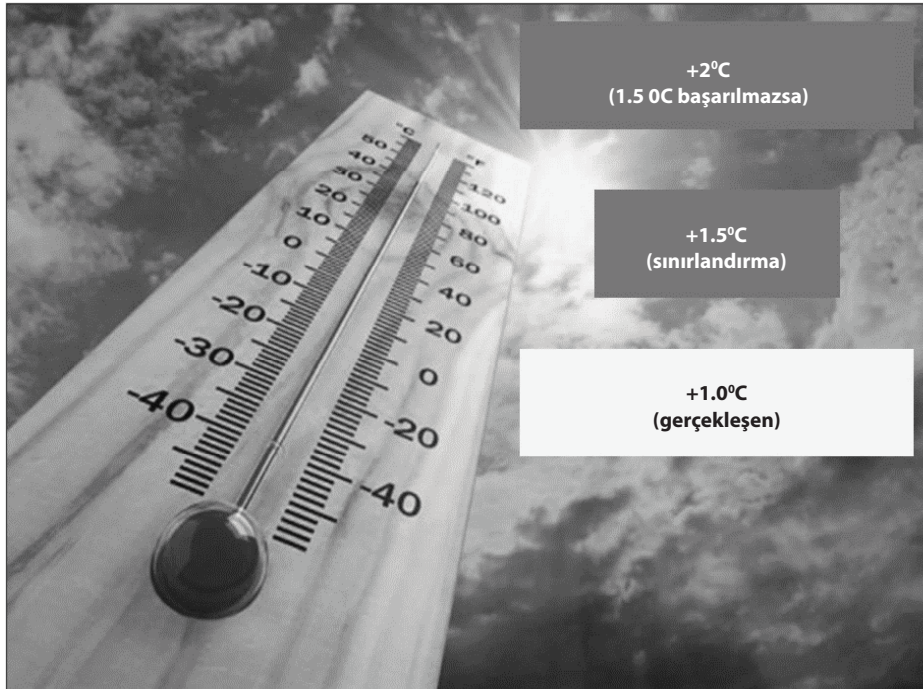
1.5 °C Küresel Isınma Raporu'nun belki de iklim politikası açısından da sürpriz olduğunu söyleyebileceğimiz en kuvvetli mesajı, aynı zamanda gerçekte birbirinden hiç de uzak olmayan iki alternatif tartışmasıdır: 1.5 °C ve 2 °C küresel ısınma hedefleri (Şekil 24).

Hükümetler 3 yıl önce Aralık 2015'te Paris Antlaşması kapsamında büyük bir istekle yükledikleri 1.5 °C hedefini kabul ettiklerinde, 2 °C'lik ısınmaya oranla hangi riskleri önledikleri konusunda çok az şey biliyordu ya da hedefe yönelik yolların neye benzediği konusunda net bilgileri yoktu.

ÖR1.5°C'nin açıklığa kavuşturduğu sorulardan biri de 1.5 °C'lik küresel ısınmanın, örneğin okyanus ekosistemlerinin kritik düzeylerine geleceği ve tropikal mercan resiflerinin %70-90 düzeyinde yok olacağı gibi büyük etkilere yol açacak olmasıdır. Bugünkü sera gazı salım oranlarının sürmesi durumunda,



Şekil 23. Küresel Sıcaklık Artışı (°C) (1850-1900 yıllarına göre) (IPCC 1.5 °C Küresel Isınma Özel Raporu, 2018; <https://www.ipcc.ch/sr15/>).



Şekil 24. IPCC 1.5 °C Küresel Isınma Raporunun küresel ısınma ya da sıcaklık artışı sınırları

söz konusu önemli risklerin 20-30 yılda gerçekleşeceği kestirilmektedir.

Raporun en önemli mesajlarından bir başkası, etkilerin 2 °C'lik ısınma senaryolarından önemli derecede daha yüksek olacağını vurgulanmasıdır. **IPCC (2018)**, 1.5 °C ile karşılaştırıldığında 2 °C'lik küresel ısınmanın olasılıkla şu anlama geldiğini göstermiştir:

- Küresel ortalama deniz seviyesi artışındaki fark, 2100 yılında 1.5 °C sınırlandırmada 2.0 °C'ye göre 10 cm (0.1 m) daha azdır. Deniz seviyesi artışı gelecekte izlenecek olan salım yollarına göre farklı oranlarda sürecektir.

- Daha düşük deniz seviyesi artışı küçük adalardaki insanların ve ekolojik sistemlerin uyum şansını artırmaktadır.

- Karasal ekosistemler ve biyoçeşitlilik üzerine olacak etkiler ile tür kayıpları 1.5 °C'de, 2.0 °C'ye göre önemli ölçüde daha azdır.

- Artışı 1.5 °C'de sınırlandırmak 2.0 °C'ye göre okyanus sıcaklıklarının artışını azaltır ve buna bağlı olan okyanus asitliğinde artış ve okyanus oksijen seviyesinde azalışta düşüş sağlar.

- Artışı 1.5 °C'de sınırlandırma durumunda 2.0 °C'ye göre karasal, sucul ve kıyısız ekosistemler üzerinde daha az etki beklenmektedir.

- Karasal türlerin iki katı kadarı iklimsel olarak belirlenmiş olan (biyom, biyotop) coğrafi yayılışlarını kaybedecektir.

- Yüzyıldan daha uzun zaman ölçeğinde 2 milyon km²'den daha fazla permafrost arazi kaybı olacaktır.

- Ortalama olarak günümüze oranla iki katı kadar insanın (bazı bölgelerde bu oran daha yüksek olacak) iklim ilişkili su stresine uğrayacaktır.

- Birkaç yüz milyon daha insan iklim ilişkili risklere maruz kalacak ve yoksulluğa karşı daha hassas olacaktır.

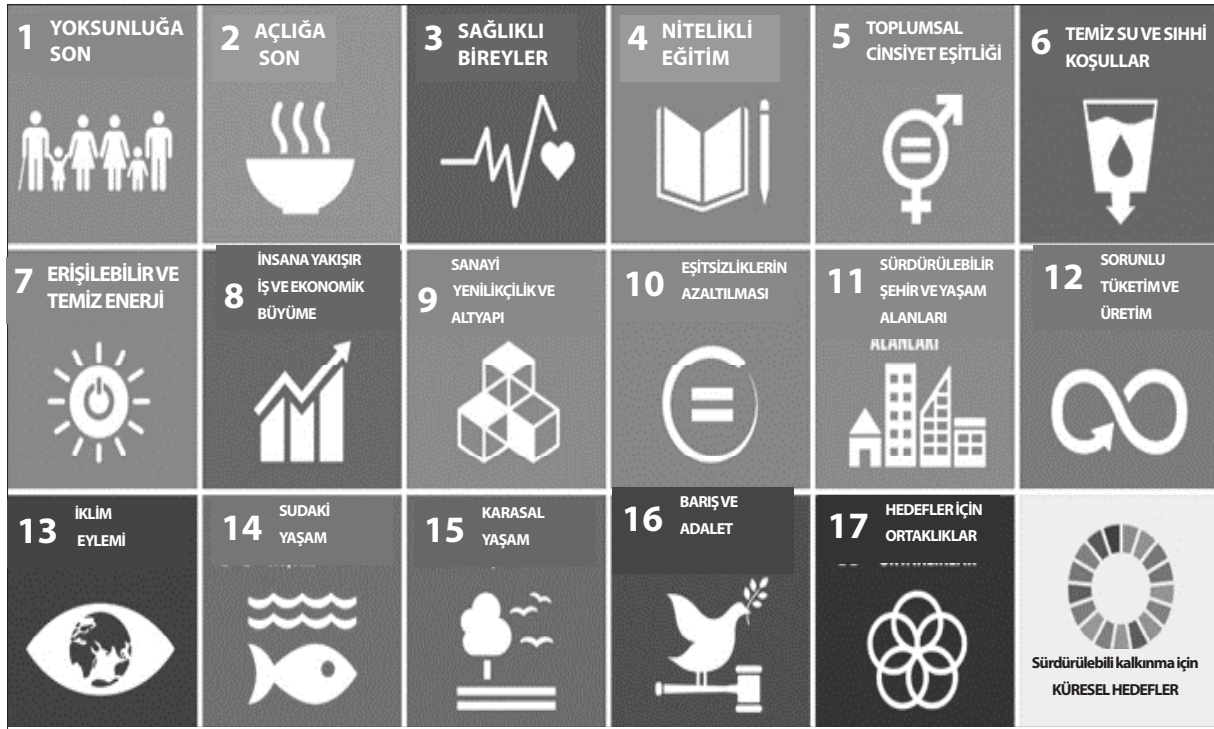
3.1.3 1.5 °C ile uyumlu salım Yolları ve Sistem Geçişleri

IPCC ÖR1.5°C ayrıca umut ışığı haberler de vermektedir!

Örneğin, Küresel ısınma düzeyini 1.5 °C'de sınırlandırmak hâlâ olasıdır, ancak bu kolay olmayacaktır.

Buna göre, 2030 yılına kadar 2010 yılına göre insan kaynaklı (antropojen) karbondioksit (CO₂) salımlarının mutlaka %45 oranında azaltılması ve 2050 yılına değin net sıfır salıma düşmesi gerekmektedir.

Bu ise, ancak enerji, sanayi, tarım, konut, ulaşımdan kaynaklanan CO₂ salımlarının 2050 yılına gelindiğinde 2010 yılına göre %75-90 oranında azaltılmış olması anlamına gelmektedir.



Şekil 25. Sürdürülebilir kalkınma hedefleri

Hedefi ileri atmıyan çoğu 1.5 °C yolu, başka ek sorunlara neden olabilecek olan karbondioksit uzaklaştırma (CRD) teknolojilerini kapsamakta ve ulaşılabilirlikleri kolay değildir.

Bu teknolojiler, doğrudan havadaki karbonun tutulması ve depolanması, artan ayrışma ve okyanus alkalileşmesi gibi belirsizlik içeren ve henüz olgunlaşmamış teknolojileri içermektedir.

Ayrıca, ormanlaştırma ve biyoteknoloji uygulamaları da geri dönülmeyecek biçimde arazi kullanımını değişikliklerini içermek zorundadır.

Bu ise tarım ve gıda sistemleri, biyolojik çeşitlilik ve diğer ekosistem hizmetleri üzerinde önemli etkilere yol açabilir.

CDR'siz yollar ulaştırma ve enerji kullanımı gibi aşanlarda yaygın davranışsal değişiklikler yoluyla önemli salım azaltımlarını kapsayan senaryolara dayanır.

3.1.4 Sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğun ortadan kaldırılması

Raporun daha pozitif bir paket mesajı ise, sürdürülebilir kalkınma ve küresel ısınmayı 1.5 °C'de sınırlandırma konuları arasındaki sinerjidir. Buna göre, 1.5 °C'ye ulaşabilecek birçok yol, insan sağlığı ya da merkezi olmayan yenilenebilir enerji sistemleri gibi yeni teknolojilerin yer aldığı enerjiye erişim benzeri kritik alanlardaki Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine (SDG) (şekil 25) ulaşılmasına yardımcı olur. Örneğin, bu kapsamda 5. Bölümde önemli ve dikkat çekici konular el alınmış durumda. Bunlar özetle aşağıdakileri içerir:

- Dünya'daki yoksulluk, eşitlik ya da eşitsizlik ve 1.5 °C daha sıcak bir Dünya'nın eşitlik ya da eşitsizlik üzerindeki yansımaları;

- İklimsel uyum ve sürdürülebilir kalkınma;

Örneğin zel Bölüm: Kurak arazilerdeki ekosistem ve toplumsal temelli uygulamalar.

- İklım değişikliği ile savaşım ve sürdürülebilir kalkınma: Sektörler, gıda güvenliği, açlık, su güvenliği, hava kirliliği ve sağlık, enerji, konutlar, vb.

- 1.5 °C küresel ısınma düzeyine yönelik sürdürülebilir kalkınma yolları;

- Sanayi ncesi döneme göre 1.5 °C daha sıcak bir Dünya'da, sürdürülebilir kalkınmaya erişim,

yoksulluğun ortadan kaldırılması ve sosyal eşit-sizliğin azaltılması yolları, vb.

Rapor ayrıca, küresel ısınma ile savaşımın, sıcak hava dalgalarından, ozon kirliliği ve malarya gibi iklim değişikliğinin tetiklediği vektör kökenli hastalıklardan kaynaklanan sağlık risklerini azalttığını göstermektedir.

Ancak su kıtlığı yaşanan bölgelerde deniz suyu tuzu artılması (desalinasyon) için artan enerji kullanımı ve fosil yakıtlara dayalı ekonomilerdeki olumsuz etkiler gibi riskler ve dengesizlikler de söz konusudur.

Rapor, iklim değişikliği etkilerinin eşitsiz ya da dengesiz dağılımının, yönetilen bir geçiş için gerekli olan uluslararası işbirliğine yönelik gereksinimleri, iklim değişikliğinin olumsuz etkileri gibi iklim değişikliği savaşım önlemlerinin olumsuz etkileri ya da yoksul ve etkilenebilir toplumlara olabilecek olumsuz etkilerin düşük kestirebileceği konusunda uyarıda bulunmaktadır.

4. Tartışma

İklım Değişikliği günümüzde üzerinde en çok durulan, en çok bilimsel araştırma yapılan ve hükümetler arası düzeyde en çok tartışılan küresel değişiklik konularının başında gelmektedir. ngrlen iklim değişiklikleri, su kaynakları, tarım, doğal ekosistemler ve insan sağlığı üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkilere sahiptir. İklımdeki değişiklikler büyüdükçe, olumsuz etkilerin egemenliği de artar. Sosyoekonomik sektörler (r. tarım, ormancılık, balıkçılık, su kaynakları ve insan yerleşmeleri, vb.), kara ve su ekosistemleri ile insanoğlunun gelişimi ve refahı için çok yaşamsal olan insan sağlığı, hava ve iklim ekstremleri ve afetleri ile iklimsel değişiklikteki değişiklikler kadar, iklim değişikliklerinin büyüklük ve hızlarına karşı da oldukça duyarlıdır.

Gelecek iklim model benzetimi çalışmalarına, örneğin ztrk ve ark. (2014 ve 2015)'nin yeni sonuçlarına göre, Türkiye'de 21'nci yüzyılın ikinci yarısından sonra ortalama hava sıcaklıkları 3 °C ile 7 °C arasında artabilecektir. Hava sıcaklıklarındaki artış, sıcak mevsimlerde daha fazladır ve artış oranı (hızı) lkenin genel olarak subtropikal Akdeniz ikliminin egemen olduğu batısından karasal iklimin egemen olduğu doğusuna gidildikçe kuvvetlenmektedir. Benzeştirilen bölgesel iklim değişikliği sonucunda, Türkiye'deki yağış tutarları -0.8 mm/gün ile 1.2 mm/gün arasında değişebilecektir. Kestirilen yağış tutarlarının coğrafi desenleri incelendiğinde, genel olarak

yazı kurak Akdeniz yağış rejiminin egemen olduğu güney ve -kış mevsimi dışında- batı bölgelerinin yıl boyunca daha az yağış alacağı (kuraklaşma) görülür. Öte yandan, genel olarak yağış rejimi düzenli (her mevsim yağışlı) nemli ılıman bir orta enlem ikliminin egemen olduğu Karadeniz Bölgesi'nin (özellikle Doğu Karadeniz Bölümü) kış ve ilkbahar mevsimlerinde ve gerçek Akdeniz iklimine göre daha serin ve kuzeyli dolaşıma ve hava sistemlerine daha açık olan Ege Denizi'nin kuzey bölümünün (Kuzey Ege) kış mevsiminde günümüze göre daha çok yağış alacağı beklenmektedir. Model sonuçlarına göre, öngörülen değişiklikler, senaryoya göre değişmekle birlikte yılın soğuk döneminde daha kuvvetli olabilecektir.

Yeni iklim model benzetimi çalışmalarından (ör. Öztürk ve ark, 2014 ve 2015; Turp ve ark., 2014) elde edilen bulgular, Türkiye'nin genel olarak artan hava sıcaklıkları ve azalan yağış tutarları nedeniyle, iklim değişikliğinden çok fazla etkileneceğini göstermektedir. Türkiye'nin Akdeniz kıyı kuşağı ve Toroslar dışında- genel olarak bugünkü iklim koşulları altında zaten az yağışlı, çok sıcak ve kuru bir sıcak dönemin (ilkbahar sonundan sonbahar ortasına kadar etkili olan yaz kuraklığı) yaşandığı, mevsimlik ve yıllararası yağış değişkenliğinin, dolayısıyla kuraklık olasılıklarının da yüksek olduğu güney ve orta-güney bölgeleri, gelecekte daha sıcak ve kuru bir iklime sahip olacaktır. Tüm bu sonuçlar ayrıca, Türkiye'nin gelecek insan kaynaklı iklim değişikliğine ve olası sonuçlarına karşı çok açık ve etkilenebilirlik düzeyinin çok yüksek olduğunu da açık bir biçimde ortaya koymaktadır.

İklim etmenleri ve bitki örtüsü dikkate alındığında, Türkiye'deki çölleşmeye eğilimli kurak araziler, karasal iç ve doğu bölgelerinin önemli bir bölümünü ve Güneydoğu Anadolu Bölgesini içerir. Akdeniz ve Ege bölgelerinin geniş bir bölümü ise, yüksek ve parçalı yeryüzü şekilleri, tarım arazilerinin yaklaşık son 40 yıldaki tarım dışı ve sürdürülebilir olmayan kullanımı, kentsel ve turizm getirisi yüksek olan tarım ve orman arazilerinin tarım ve orman rejimi dışına çıkarılmasına yönelik girişimler ve yasal düzenlemeler, sanayi, turizm ve orman yangınları gibi iyi bilinen öteki doğal ve insan kaynaklı etmenler dikkate alındığında, gelecekte çölleşme süreçlerinden daha fazla etkilenebilecek yarınemli alanlar olarak kabul edilmelidir (Türkeş, 2012b; Türkeş, 2013b; Türkeş, 2017b; Türkeş, 2017c). Uzun süreli ve şiddetli yaz kuraklıklarının ve yüksek hava sıcaklıklarının yanı sıra, yağış ve kuraklık indisi dizilerinde gözlenen kurak koşullara yönelik değişme

eğilimlerinin, Akdeniz ve Ege bölgelerinde iklim etmenlerinin çölleştirme kuvvetini arttırmakta oluşu, bu düşünceyi destekler niteliktedir.

Türkiye'nin, depremin yanı sıra, özellikle kuraklık, sel ve taşkınlar, fırtınalar ve kütle hareketleri (helyan, toprak kayması, çamur akması, vb.) gibi doğal afetlerden etkilenebilirliği ve risk değerlendirmeleri az çok bilinmektedir. Türkiye'deki en büyük sorun, hem Afet Risk Yönetimi ve Afet Etkilerinin Azaltılması yasa, yönetmelik ve ilkelerinin uygulama/denetleme eksikliği hem de doğru etkilenebilirlik/risk ve adaptasyon (uyum) çözümlerinin yapılması için gerekli olan gerçek sosyoekonomik etkilenebilirlik verilerin yokluğudur ya da eksik/yetersiz de olsa var olan verilerin kullanılabilir/erişilebilir olmamasıdır. Örneğin, Türkiye ve bölgesinin depremselliği ve deprem coğrafyası ya da kuraklık klimatolojisi ve kuraklık olasılıkları (fiziksel etkilenebilirlik ya da etkilenebilirlik) oldukça iyi bilinmesine karşın, gerçek verilere dayalı sosyoekonomik etkilenebilirlik veri ve bilgileri eksik ya da kullanılabilir/erişilebilir değildir (Türkeş, 2017b; Türkeş, 2018). Bu büyük bir eksiklik hatta sorundur. Burada önemli olan, iyi hazırlanmış afet etkilenebilirlik ve risk çözümlerleri ve raporları ile afet izleme, değerlendirme ve öngörü sistemlerine dayanan Afet Risk Yönetimi ve Afet Etkilerinin Azaltılması ilkelerine göre deprem ve diğer tüm afetlere hazır olup afetlerle en az can ve mal kaybı ve hasarla baş edebilmektir.

Konunun başka bir yönü ise, büyük kentlerde gerçekleşen afetlerde genellikle hemen hiç bir kurum ve kuruluşun doğrudan sorumluluk almama eğiliminde olmasıdır. Dahası, şiddetli ve uzun süreli sağanak yağışların kentlerde neden olduğu kentsel sel ve taşkınlar gibi doğal/insan kaynaklı birleşik afetlerden (kötü yönetim, yanlış planlama ve tasarımıyla bağlantılı insan kaynaklı kentsel afetler) ders çıkarılmıyor, mühendislik uygulamaları çok zayıf ve yanlış, kentlerin gelişim planlarında kent ve yöresinin doğal fiziki coğrafyası, özellikle doğal topografyası, jeomorfolojisi, eski ya da doğal akarsu ağı, taşkın ova ve yatakları, hâkim ve yerel rüzgârlar, vb. hiç dikkate alınmıyor. Sonuç olarak, orta kuvvetli ama biraz uzun süreli sağanak yağışlar bile, yukarıda açıkladığımız sorun ve eksiklikler ile kentlerin büyük bölümü, beton ve asfaltla kaplı olduğu için, kentsel taşkın ve sellere dönüşüyor.

İklimsel değişkenliğin sonuçlarından birisi olan kuraklık, olağan dışı bir hava ve iklim olayı ya da bir doğal afet olarak kabul edilir. Kuraklığın tarım üzerine etkisi

çok karmaşık etmenlerin bileşiminden oluştuğu için, bunları birbirinden ayırmak her zaman mümkün olmayabilir. Benzer biçimde, başta arazi bozulması ve iklim değişikliği gelmek üzere çok karmaşık etmen ve süreçlerin kurak, yarı kurak ve kurakça yarınemli arazilerde bir araya gelmesiyle oluşan çölleşme için de, çölleşmeye neden olan doğal (fiziki coğrafi, hidrolojik, biyolojik, ekolojik ve toprağa ilişkin) ve insan kaynaklı (yanlış arazi kullanımı, arazi kullanımı değişikliği, ormansızlaşma, aşırı tarımsal üretim, otlatma, su kullanımı ve sulama, tarımsal mücadele ilaçları ve gübre kullanımı, vb.) etmenlerin çölleşme üzerindeki işlevi, önemi ve önceliğine göre ayrıştırılması ve belirlenmesi gereklidir. Bunun için, belirli bir olasılıksal hata ya da risk düzeyi altında, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) (Saaty, 1980), Çevresel ve Sosyal Etkilenbilirlik ve Risk Çözömlenmeleri; Topsis ve Electre gibi çeşitli "karar verme" ve/ya da öncelik belirleme yöntemleri uygulanabilir.

Kaynaklar

Altınsoy, H., Öztürk, T., Türkes, M., Kurnaz M. L. (2012). Simulating the climatology of extreme events for the central Asia domain using the RegCM 4.0 regional climate model. pp. 365-370: C.G. Helmis and P. Nastos (eds.), *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*. Springer-Verlag, Berlin.

Dotzek, N., Groenemeijer, P., Feuerstein, B., Holzer A. M. (2009). Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmos. Res.*, 93: 575-586.

Erlat, E., Türkes, M. (2008). Türkiye'de don olaylı gün sayılarındaki değişiklikler ve Arktik Salınım ile bağlantısı. IV. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu Bildiri Kitabı: 426-436. 25-28 Mart 2008, İstanbul.

Erlat, E., Türkes, M. (2012). Analysis of observed variability and trends in numbers of frost days in Turkey for the period 1950-2010. *International Journal of Climatology*, 32: 1889-1898.

Erlat, E., Türkes, M. (2013). Observed changes and trends in numbers of summer and tropical days, and the 2010 hot summer in Turkey. *International Journal of Climatology*, 33 (8): 1898-1908.

Erlat, E., Türkes, M. (2015). Türkiye rekor maksimum ve minimum hava sıcaklıklarının frekanslarında 1950-2014 döneminde gözlenen değişimler ve atmosfer koşullarıyla bağlantıları (Observed changes in the frequencies of record maximum and record minimum air temperatures in Turkey during the period 1950-2014 and their connections with atmospheric conditions). *Ege Coğrafya Dergisi* 24(2): 29-55, (in Turkish with an English abstract, figure and table captions).

Erlat, E., Türkes, M. (2016). Dates of frost onset, frost end and the frost-free season in Turkey: trends, variability and links to the North Atlantic and Arctic Oscillation indices, 1950-2013. *Climate Research* 69: 155-176. doi: 10.3354/cr01397

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T.F., ve ark. (eds.): Cambridge University Press, Cambridge and New York.

IPCC. (2018) *Summary for Policymakers*. In: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C.

Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. *World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland*, 32 pp

Kartum, Ş., Koç, T., Türkes, M. (2011). Türkiye'de kar yağışlarının başlangıç ve bitiş tarihlerinde gözlenen değişiklikler ve eğilimler. V. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu Bildiri Kitabı: 195-200, 27-29 Nisan 2011, İstanbul.

Kuglitsch, F. G., Toreti, A., Xoplaki, E., Della-Marta, P.M., Zerefos, C. S., Türkes, M. and Luterbacher, J. (2010). Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960. *Geophysical Research Letters*, 37: L04802.

Kutieli, H., Türkes, M. (2017). Spatial and temporal variability of dryness characteristics in Turkey. *International Journal of Climatology*, 37(Suppl.1): 818-828.

Lolis, C. J., Türkes, M. (2016). Atmospheric circulation characteristics favouring extreme precipitation in Turkey. *Climate Research* 71: 139-153. doi: 10.3354/cr01433

Önol, B., Semazzi, F.H.M. (2009). Regionalization of climate change simulations over the Eastern Mediterranean. *Journal of Climate*, 22: 1944-1960.

Önol, B., Unal, Y. (2014). Assessment of climate change simulations over climate zones of Turkey. *Regional Environmental Change*, 14(5): 1921-1935.

Ozturk, T., Altınsoy, H., Türkes, M., Kurnaz M. L. (2012). Simulation of temperature and precipitation climatology for central Asia CORDEX domain by using RegCM 4.0. *Climate Research*, 52: 63-76.

Öztürk, T., Türkes, M., Kurnaz, L. (2014). RegCM4.3.5. İklim modeli benzetimleri kullanılarak Türkiye'nin gelecek hava sıcaklığı ve yağış klimatolojilerindeki değişikliklerin çözömlenmesi. *Ege Coğrafya Dergisi* 20(1): 17-27.

Öztürk, T., Ceber, Z. P., Türkes, M., Kurnaz, M. L. (2015). Projections of climate change in the Mediterranean Basin by using downscaled global climate model outputs. *International Journal of Climatology*, 35: 4276-4292. DOI: 10.1002/joc.4285Petit, J.R. et al. 1999. Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica. *Nature*, 399: 429-436.

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill: New York.

Sen, B., Topcu, S., Türkes, M., Sen, B., Warner, J. F. (2012). Projecting climate change, drought conditions and crop productivity in Turkey. *Climate Research*, 52: 175-191.

Sneyers, R. (1990). *On the Statistical Analysis of Series of Observations*. WMO Technical Note 43, World Meteorological Organization, Geneva.

Tatlı, H., Türkes, M. (2008). Türkiye'deki 2006/2007 kuraklığı ile geniş ölçekli atmosferik değişkenler arasındaki bağlantının lojistik regresyonla belirlenmesi. IV. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu Bildiri Kitabı: 516-527, 25-28 Mart 2008, İstanbul.

Tatlı, H., Türkes, M. (2011). Examination of the dry and wet conditions in Turkey via model output statistics (MOS). 5th Atmospheric Science Symposium Proceedings Book: 219-229, 27-29 April 2011, İstanbul.

Trigo, R. ve ark. (2006). Relations between variability in the Mediterranean region and mid-latitude variability. Pp. 179-226: Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., and Boscolo, R. (Eds.), *Chapter 3, Mediterranean Climate Variability*. Elsevier Developments in Earth & Environmental Sciences 4, Amsterdam.

Turp, M. T., Öztürk, T., Türkes, M., Kurnaz, M. L. (2014). RegCM4.3.5 bölgesel iklim modelini kullanarak Türkiye ve çevresi bölgelerinin yakın gelecekteki hava sıcaklığı ve yağış klimatolojileri için öngörülen değişikliklerin incelenmesi. *Ege Coğrafya Dergisi*, 23(1): 1-24.

Türkes, M. (1996). Spatial and temporal analysis of annual rainfall variations in Turkey. *International Journal of Climatology*, 16: 1057-1076.

- Türkeş, M.** (1998). Influence of geopotential heights, cyclone frequency and southern oscillation on rainfall variations in Turkey. *International Journal of Climatology*, 18: 649-680.
- Türkeş, M.** (1999). Vulnerability of Turkey to desertification with respect to precipitation and aridity conditions. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 23: 363-380.
- Türkeş, M.** (2000). 'El Niño-Güneyli Sahnım ekstremleri ve Türkiye'deki yağış anomalileri ile ilişkileri'. *Çevre, Bilim ve Teknoloji*, 1: 1-13.
- Türkeş, M.** (2011a). Dünyada ve Türkiye'de iklim değişikliği, kuraklık ve çölleşme. s: 5-19 II. Ulusal Toprak ve Su Kaynakları Kongresi Bildiri Kitabı (EK), 22-25 Kasım 2011, Ankara.
- Türkeş, M.** (2011b). Akhisar ve Manisa yörelerinin yağış ve kuraklık indisi dizilerindeki değişimlerin hidroklimatolojik ve zaman dizisi çözümlemesi ve sonuçların çölleşme açısından coğrafi biresimi. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 9 (1): 79-99.
- Türkeş, M.** (2012a). Küresel İklim Değişikliği ve Çölleşme. S: 1-42. Ed. N. Özgen. *Günümüz Dünya Sorunları - Disiplinlerarası Bir Yaklaşım. Eğiten Kitap*, Ankara.
- Türkeş, M.** (2012b). Kuraklık, çölleşme ve Birleşmiş Milletler Çölleşme ile Savaşım Sözleşmesi'nin ayrıntılı bir çözümlemesi. *Marmara Avrupa Araştırmaları Dergisi, Çevre Özel Sayısı*, 20: 7-56.
- Türkeş, M.** (2013a). İklim Değişiklikleri: Kambriyen'den Pleyistosen'e, Geç Holosen'den 21. Yüzyıla. *Ege Coğrafya Dergisi*, 22(1): 1-25.
- Türkeş, M.** (2013b). Türkiye'de gözlenen ve öngörülen iklim değişikliği, kuraklık ve çölleşme. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2): 1-32.
- Türkeş, M.** (2013c). IPCC İklim Değişikliği 2013: Fiziksel Bilim Temeli Politikacılar İçin Özet Raporundaki Yeni Bulgu ve Sonuçların Bilimsel Bir Değerlendirmesi. S: 8-18. *İklim Değişikliğinde Son Gelişmeler: IPCC 2013 Raporu. Sabancı Üniversitesi İstanbul Politikalar Merkezi, İstanbul*.
- Türkeş, M.** (2014a). Örneklerle Dünyada ve Türkiye'de iklim değişikliği ve değişkenliği. *Bilim ve Gelecek*, 129: 60-64.
- Türkeş, M.** (2014b). Türkiye'deki 2013-2014 kuraklığının ve klimatolojik/meteorolojik nedenlerinin çözümlemesi (Analysis of 2013-2014 Drought in Turkey and Its Climatological and Meteorological Reasons). *Konya Toprak Su Dergisi*, 2: 20-34. (in Turkish and English)
- Türkeş, M.** (2015a). Gökğürültülü fırtınalar ve oluşum düzenekleri. *Bilim ve Gelecek* 131: 84-87.
- Türkeş, M.** (2015b). Hortumlar ve oluşum düzenekleri. *Bilim ve Gelecek* 132: 80-83.
- Türkeş, M.** (2016). Küresel İklim Değişiklikleri ve Başlıca Nedenleri ile Dünyada ve Türkiye'de Gözlenen ve Öngörülen İklim Değişiklikleri ve Değişkenliği. İçinde: "Küresel İklim Değişikliği ve Etkileri" Engin Ural Anısına (Ed: M. Somuncu), s. 71-115. *Türkiye Çevre Vakfı Yayını*, Ankara.
- Türkeş, M.** (2017a). Genel Klimatoloji: Atmosfer, Hava ve İklimin Temelleri. Gözden Geçirilmiş İkinci Baskı, *Kriter Yayınevi Fiziki Coğrafya Serisi* No: 4, ISBN: 978-605-9336-28-4, xxiv + 520 sayfa. *Kriter Yayınevi, Berdan Matbaası: İstanbul*.
- Türkeş, M.** (2017b). Türkiye'nin iklimsel değişkenlik ve sosyolojik göstergeler açısından kuraklıktan etkilenebilirlik ve risk çözümlemesi. *Ege Coğrafya Dergisi* 26(2): 47-70.
- Türkeş, M.** (2017c). Birleşmiş Milletler Çölleşme ile Savaşım Sözleşmesi ve Türkiye'nin Durumu-Uyumu. İçinde: *Uluslararası Çevre Rejimleri* (Der. G. Orhan, S. C. Mazlum, Y. Kaya), 1. Baskı, s. 169-197. *Dora Basım-Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Bursa*. ISBN: 9789752447530
- Türkeş, M.** (2018). İklim Değişikliğinin Etkileri, Türkiye'nin İklim Değişikliği Uyum Gereksinimleri, Etkilenebilirlik ve Risk Değerlendirmeleri. *İklim Değişikliği ve Kalkanma* (Ed. İzzet Arı). T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, Ankara.
- Türkeş, M., Erlat, E.** (2003). Precipitation changes and variability in Turkey linked to the North Atlantic Oscillation during the period 1930-2000. *International Journal of Climatology*, 23: 1771-1796.
- Türkeş, M., Erlat, E.** (2005). Climatological responses of winter precipitation in Turkey to variability of the North Atlantic oscillation during the period 1930-2001. *Theoretical and Applied Climatology*, 81: 45-69.
- Türkeş, M., Erlat, E.** (2006). Influences of the North Atlantic Oscillation on precipitation variability and changes in Turkey. *Nuovo Cimento Della Società Italiana Di Fisica C-Geophysics and Space Physics*, 29: 117-135.
- Türkeş, M., Erlat, E.** (2008). Influence of the Arctic Oscillation on variability of winter mean temperatures in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 92: 75-85.
- Türkeş, M., Erlat, E.** (2009). Winter mean temperature variability in Turkey associated with the North Atlantic Oscillation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 105: 211-225.
- Türkeş, M. and Erlat, E.** 2018. Variability and trends in record air temperature events of Turkey and their associations with atmospheric oscillations and anomalous circulation patterns. *International Journal of Climatology* 38: 5182-5204. <https://doi.org/10.1002/joc.5720>
- Türkeş, M., Sümer, U.M.** (2004). Spatial and temporal patterns of trends and variability in diurnal temperature ranges of Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 77: 195-227.
- Türkeş, M., Tatlı, H.** (2009). Use of the standardized precipitation index (SPI) and modified SPI for shaping the drought probabilities over Turkey. *International Journal of Climatology*, 29: 2270-2282.
- Türkeş, M., Erlat, E.** (2018). A scientific assessment of observed changes and trends in extreme weather and climate events in the world and Turkey. In Meltem Ucal (Ed.), *Climate Change and Green Perspective: Green Economy, Green Growth* (pp. 5-38). *İstanbul, Turkey: Heinrich Böll Stiftung Foundation*.
- Türkeş, M., Yıldız, D.** (2014). Gözlenen Bugünkü ve Benzeştirilen Gelecek Yağış Değişimleri ve Kuraklık Olayları Perspektifinde Türkiye'de Hidroelektrik Santrallerin Geleceği. 22 Ocak 2014. *Hidroelektrik Akademi İklim Değişikliği ve Kuraklık Çalışmaları*, Ankara.
- Türkeş, M., Sümer, U. M., Demir, İ.** (2002). Re-evaluation of trends and changes in mean, maximum and minimum temperatures of Turkey for the period 1929-1999. *International Journal of Climatology*, 22: 947-977.
- Türkeş, M., Koç, T., Sarıç, F.** (2009a). Spatiotemporal variability of precipitation total series over Turkey. *International Journal of Climatology*, 29: 1056-1074.
- Türkeş, M., Akgündüz, A.S., Demirörs, Z.** (2009b). Palmer Kuraklık İndisi'ne göre İç Anadolu Bölgesi'nin Konya Bölümü'ndeki kurak dönemler ve kuraklık şiddeti. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 7(2): 129-144.
- Türkeş, M., Kurnaz, M. L., Öztürk, T., Altınsoy, H.** (2011). Climate changes versus 'security and peace' in the Mediterranean macroclimate region: are they correlated? Pp: 625-639. *Proceedings of International Human Security Conference on Human Security: New Challenges, New Perspectives. 27-28 October 2011, İstanbul*. https://www.artigercek.com/yazarlar/pelincengiz/iklim-degisir-akdeniz-olmaz-akdeniz-de-hortum-olur-firtina-olur?fbclid=IwAR2oxBsVKMj4GzsDaRBj2JKx5dW5dwTg4J6XeHbVkJQF3_Tc4G5yeY2ah8E
<https://www.essl.org/cms/european-severe-weather-database/>
<http://www.hurriyetdailynews.com/climate-scientist-warns-of-possible-increase-in-number-of-whirlwinds-in-turkey-117179>
<http://www.globalwarmingindex.org/>
<https://www.ipcc.ch/sr15/>