

MADDE

 Check for updates<https://doi.org/10.1038/s41467-021-23584-0>

AÇIK

Avrupa Birliği'nin kuraklığa karşı sınır ötesi iklimsel kırılganlıkları

Ertuğ Erçin^{1,2}✉, Ted IE Veldkamp³ & Johannes Hunink⁴

Avrupa Birliği'nin iklim değişikliğine karşı kırılganlığı, et ve süt ürünleri gibi ekonomik sektörlerinin çoğunun uzaklardan kaynaklanan ham maddeleri kullanması nedeniyle sınırlarının çok ötesine uzanmaktadır. Sınır ötesi iklim kırılganlığı, bilimsel literatürde nispeten yeni bir konu olmasına rağmen, yüksek toplumsal ve ekonomik öneme sahiptir. Bu iklim kırılganlıklarını kuraklık riskine odaklanarak niceliksel olarak belirledik ve bunları 2030, 2050, 2085 ve RCP 2.6 ve 6.0 iklim senaryoları için değerlendirdik. Burada, AB tarımsal ithalatının %44'ünden fazlasının iklim değişikliği nedeniyle gelecekte kuraklığa karşı oldukça kırılgan hale geleceğini görüyoruz. Tarımsal ithalatın üretim yerlerindeki kuraklık şiddeti, 2050 yılında mevcut kuraklık şiddeti seviyelerine kıyasla %35 artacaktır. Bu, özellikle Brezilya, Endonezya, Vietnam, Tayland, Hindistan ve Türkiye'den kaynaklanan ithalatlar için geçerlidir. Aynı zamanda, Rusya, Nijerya, Peru, Ekvador, Uganda ve Kenya'dan yapılan ithalatlar gelecekte daha az kırılgan olacaktır. Ayrıca et ve süt ürünleri, çikolata (kakao), kahve, palmiye yağı bazı gıda ve kozmetik sektörlerinin iklimsel kırılganlıklarının esas olarak AB sınırları içinde değil, dışında olduğunu bildiriyoruz.

¹R2Water Araştırma ve Danışmanlık, Amsterdam, Hollanda.²Çevre Araştırmaları Enstitüsü, Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam, Hollanda.
³Amsterdam Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Amsterdam, Hollanda.⁴FutureWater, Kartagena, İspanya. ✉eposta:ercin@r2water.nl

R Son yıllarda Avrupa'da sıcak hava dalgalarında ve benzeri görülmemiş kuraklık koşullarında artış görüldü. Bu, Avrupa'nın tarımsal üretimini bozdu¹⁻⁴ İklim değişikliği tahminlerine göre, bu tür aşırı hava olaylarının artması muhtemeldir.⁵⁻⁷ Ancak Avrupa'nın aşırı hava olaylarına ve iklim değişikliğine karşı savunmasızlığı, sınırlarının çok ötesine uzanıyor çünkü et ve süt ürünleri gibi ekonomik sektörlerinin ve gıda tüketiminin çoğu, uzaklardan gelen hammaddeleri kullanıyor⁸. Uluslararası ticaret yoluyla bu ürün akışı, bu sektörlerin orijinal üretim bölgelerinde aşırı hava olaylarına ve iklim değişikliğine karşı savunmasız olduğu anlamına gelir. Örneğin, Avrupa Birliği (AB), yerel olarak yetiştirilen ürünlerin kullanımı yerine hayvan yemi talebini karşılamak için neredeyse tamamen soya fasulyesi ithalatına güvenmektedir.⁹ AB yılda yaklaşık 30-35 milyon ton soya fasulyesi ithal ediyor ve yılda sadece 0,9 milyon tonunu yurt içinde üretiyor.¹⁰ AB'de soya fasulyesi üretimindeki açık, hayvancılık için ana yem kaynağı olması nedeniyle, özellikle et ve süt endüstrisi için ekonomisi açısından önemli bir risk oluşturmaktadır.¹¹⁻¹³ Bu, AB'yi, AB'ye ihraç edilmek üzere soya fasulyesi üreten ülkelerde aşırı sıcaklık gibi hava şokları sonucu oluşabilecek soya fasulyesi üretiminin herhangi bir kesintisine karşı oldukça savunmasız hale getirir. Sonuç olarak, AB içindeki kuraklıklar ve yağış eksikliği, tarım endüstrisini olumsuz etkileyebilecek tek olgu değildir. AB tarafından ithal edilen gıdayı üreten bölgelerde kuraklık meydana gelirse, arzı kesintiye uğratır. Sonuç olarak, emtia fiyatları değişir ve bu da AB içinde ekonomik hasara ve sosyal bozulmaya yol açabilir.¹⁴⁻¹⁶

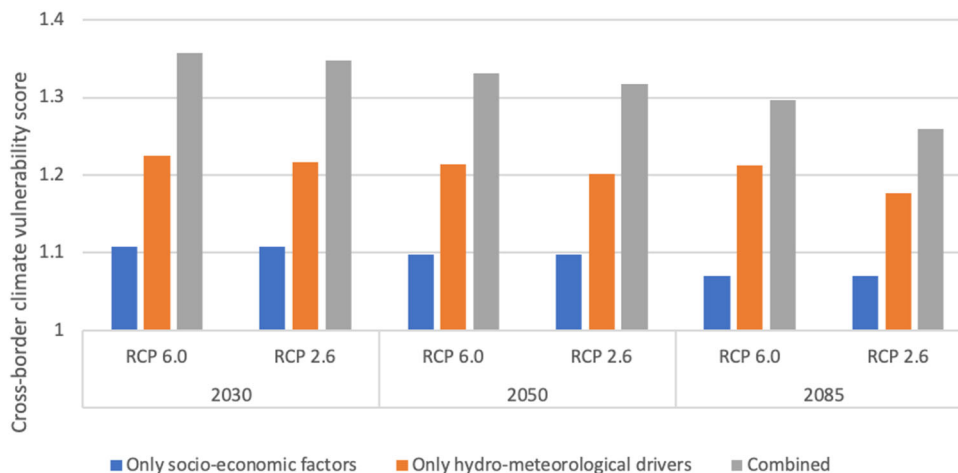
Son on yılda, tarım da dahil olmak üzere çeşitli sektörlerin iklim değişikliği ve aşırı hava olaylarına karşı kırılganlığına odaklanan bilimsel literatürden giderek artan sayıda değerlendirme ortaya çıktı¹⁷⁻²¹ Bu çalışmalar, doğal veya sosyal bir sistemin iklim değişikliği etkilerinden kaynaklanan hasara maruz kalma olasılığı olarak tanımlanan ve maruz kalma, hassasiyet ve uyum kapasitesinin bir fonksiyonu olan, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) yerleşik kırılganlık tanımını benimsemiştir.²² Bu çalışmaların çoğu, belirli bir bölgedeki belirli bir sektöre (örneğin kahve, tarım) yönelik uygulama zafiyetini uyguladı ve çeşitli maruz kalma ve hassasiyet bileşenlerinin tek bir zafiyet çerçevesine birleştirildiği entegre değerlendirmeler sağladı. Bu arada, tarımın iklim zafiyet değerlendirmeleri, hem dış hem de iç perspektiflerden analiz etmek yerine, coğrafi bir alandaki üretim düğümüne odaklanır.²³

Sonuç olarak, coğrafi bir bölgenin sınır ötesi iklimsel kırılganlıklarına ilişkin bilgi ve araştırma ihmal edilmiş olup, bilimsel literatürde hala nispeten yeni bir konudur.²⁴⁻²⁶ 2014 yılında 'bölgeler arası fenomenleri' inceleyen IPCC'nin Beşinci Değerlendirme Raporu'nun (AR5) ardından²⁷ Bazı araştırmalar küresel, bölgesel ve ulusal ölçekte sınır ötesi iklim zaafırlarını ele aldı^{8,28-34}. Bunlar esas olarak nitel analize ve ülkeye özgü vaka çalışmalarına odaklanmış, sıcak nokta ihracat alanlarındaki olası iklim etkilerine ilişkin bir içgörü sunmuşlardır. Bu nedenle, nicel analizlerden yoksundular ve hangi mahsullerin ve mahsul gruplarının en savunmasız olduğunu veya savunmasızlıkların mevcut iklim koşullarına kıyasla gelecekte nasıl değişeceğini değerlendirmediler.

Bu bilgi açığını kapatmak için, üçüncü ülkelerdeki kuraklık şiddetine göre AB'nin tarımsal gıda ekonomisinin sınır ötesi iklim kırılganlıklarını sınır ötesi iklim kırılganlık puanı (CCVS) olarak ifade ederek niceliksel olarak belirledik ve haritaladık. Sınır ötesi kırılganlıkları niceliksel olarak belirlemek ve haritalamak için, öncelikle AB'nin tarımsal gıda ithalatının üretim yerlerindeki yağış kullanımına, yeşil sanal su ithalatına bağımlılığını hesapladık.³⁵, 2030, 2050 ve 2085 hedef yıllarına kadar Paylaşılan Sosyoekonomik Yollar 2 (SSP2) kullanılarak³⁶ özellikler. Daha sonra, AB'nin dış yağış bağımlılığındaki önemlerine göre önemli ithal edilen ürünleri seçtik. Bir sonraki adımda, farklı iklim değişikliği senaryoları altında (Temsili Konsantrasyon Yolu 2.6 ve 6.0 altında) ihracat lokasyonlarında kuraklık şiddetinin nasıl değiştiğini hesapladık. Son adım, ihracat bölgelerinin iklim değişikliğine uyum kapasitesini değerlendirmektir. Tüm bu üç unsuru birleştirmek, AB'nin tarımsal gıda ekonomisinin kuraklığa karşı sınır ötesi iklim hassasiyetlerini, farklı iklim koşullarında maruziyet ve duyarlılıktaki değişikliklerin ihracat bölgelerinin iklim değişikliğine uyum kapasitesiyle çarpılmasıyla hesaplanan bir puan cinsinden ifade eder.

Sonuçlar

AB'nin kuraklığa karşı sınır ötesi iklimsel kırılganlıkları. Şekilde görüldüğü gibi, küresel iklim değişikliği AB'nin tarımsal gıda ekonomisini gelecekte AB dışındaki ülkelerdeki kuraklığa karşı daha savunmasız hale getirecektir.¹ AB'nin tarımsal gıda ekonomisinin kuraklığa karşı sınır ötesi iklim kırılganlığı puanı (CCVS), 2030, 2050 ve 2085 için RCP 2.6 ve RCP 6.0 konsantrasyon yolları altında, 1.20 ile 1.35 arasında olup, orta düzeyde bir iklim kırılganlığını temsil eder. 1.25-1.35'lik bir CCVS, toplamın



Şekil 1. RCP 2.6 ve RCP 6.0 konsantrasyon yolları altında 2030, 2050 ve 2085 yıllarında AB'nin tarımsal gıda ekonomisinin kuraklığa karşı sınır ötesi iklim kırılganlığı skoru (CCVS). Mavi çubuklar yalnızca sosyo-ekonomik etkenler dikkate alındığında CCVS'leri; turuncu çubuklar yalnızca hidrometeorolojik etkenler dikkate alındığında; gri çubuklar ise her iki etken dikkate alındığında ortaya çıkmaktadır.

AB'nin tarımsal ithalatının gelecekte kuraklığa karşı bugünkü duruma kıyasla %25-35 daha fazla duyarlı hale geleceği öngörülmektedir. Bu durum, ithal edilen ürünlerin üretim yerlerinde kuraklığın şiddetinde değişiklik, kuraklık olaylarının yoğunluğunda ve süresinde artış gibi nedenlerle ortaya çıkmaktadır.

Figür1 ayrıca sürücü türüne göre ayrıştırılmış CCVS'leri de içerir. Hesaplamalarda iki tür sürücü kullandık: (i) nüfus, Gayri Safi Yurtiçi Hasıla, ticaret politikaları, gıda talebi vb. gibi sosyoekonomik sürücüler (AB tarafından yapılan tarımsal ithalat sayısındaki herhangi bir müteakip değişikliği göz önünde bulundurarak); ve (ii) kuraklık şiddeti için hidro-meteorolojik sürücüler. Her iki sürücüyü ayrı ayrı inceleyerek, ihracatçı ülkelerdeki kuraklık şiddetindeki değişikliklerin CCVS'lerin arkasındaki en önemli belirleyici faktör olduğunu görüyoruz. Şekil1 AB'nin CCVS'lerinin her iki RCP senaryosu için de 2030 civarında zirveye ulaşacağını (CCVS'ler yaklaşık 1,35'te) göstermektedir. 2085'te düşmeye başlamadan önce 2050'de benzer seviyelerde kalacaklardır (biraz azalarak). Gözlemlenen düşüş esas olarak 2085'te AB'deki nüfus azalmasıyla (ve buna bağlı olarak AB tarafından tarımsal ithalata yönelik talep değişiklikleriyle) ilgilidir, 2030 ve 2050 nüfus tahminlerine kıyasla. Analizimiz, AB'nin tarımsal ithalatının RCP 2.6 altında RCP 6.0 konsantrasyon yoluna göre kuraklığa karşı daha az hassas olacağını göstermektedir. En büyük fark 2050'den sonra ve 2085'te gözlemlenmektedir. Bu, zirve ve düşüş senaryosu olan RCP 2.6'nın özellikleriyle tutarlıdır.

AB'nin tarımsal gıda ekonomisinin CCVS'si 1,25'ten fazla olsa da, ihracatçı ülkeler arasındaki mekansal dağılımı önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Örneğin, 2050'deki RCP 6.0 konsantrasyon yolu altında, AB'nin Brezilya'dan (AB'ye en büyük yeşil sanal su ihracatçısı ülke) tarımsal ithalatına ilişkin CCVS'si 1,5'in üzerindedir ve bu da yüksek bir kırılganlık seviyesini göstermektedir. Diğer ihracatçı ülkelere tarımsal ithalata ilişkin CCVS, 3,5'in üzerinde olan Endonezya'da en yüksektir ve bu da AB ithalatı için çok yüksek bir kırılganlık seviyesini göstermektedir. Bunu 1,5 ile Hindistan takip etmektedir. Fildişi Sahili, Gana, Malezya, Paraguay, Kamerun ve Arjantin gibi diğer ülkelere ilişkin CCVS'ler 1 ile 1,5 arasındadır. Buna karşılık, bazı ülkelere yapılan ithalatlar gelecekte kuraklığa karşı daha az kırılganlık göstermektedir. Örneğin, Nijerya, Çin, Ekvador, Peru ve Uganda'dan yapılan tarımsal ithalatlara ilişkin CCVS'ler, 2050 yılında RCP 6.0 konsantrasyon yolu altında 1'den düşüktür (Şekil.2 RCP 2.6 konsantrasyon yoluna ilişkin harita ek bilgi bölümünde verilmiştir, lütfen Şekil S1'e bakınız).

İhracat bölgesine göre uyarlanabilir kapasite, ihracatçı ülke başına CCVS'yi değerlendirmede önemli bir unsur olabilir. Bazı ülkelerde, tarımın iklim değişikliğine karşı yüksek uyarlanabilir kapasitesi (sulama, gübre ve pestisit kullanımı ve traktör kullanımı ile donatılmış tarım alanları açısından ifade edilir, "Yöntemler" bölümüne bakın) sınır ötesi kırılganlıkları azaltır. Örneğin, uyarlanabilir kapasite bileşeni olmayan Amerika Birleşik Devletleri'nin (ABD) CCVS puanı, uyarlanabilir kapasite bileşeni olan CCVS'den 0,2 daha yüksek olan bir olacaktır. Benzer şekilde, Malezya'da (1,35'ten 0,7'ye) ve Endonezya'da (3,9'dan 3,5'e) CCVS'lerde önemli bir azalma gözlemlenmiştir. Diğer büyük yeşil su ithal eden ülkelerde uyarlanabilir kapasitenin etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

AB'nin tarımsal ithalatında kuraklık şiddeti düzeyi. CCVS'ler bize iklim değişikliği altında kuraklığa karşı hassasiyetlerdeki değişiklikleri, mevcut durumla karşılaştırarak söyler, ancak kuraklığın ihracat yapılan yerlerde ne kadar şiddetli olacağını ortaya koymaz. Bu soruyu cevaplamak için, AB'nin tarımsal ithalat hacmini farklı iklim koşullarında kuraklık şiddeti haritalarıyla üst üste koyduk. Üretim yerlerinde beş kuraklık şiddeti seviyesi kullandık: düşük; düşük-orta; orta; yüksek; ve aşırı yüksek³⁷ Düşük kuraklık

Şiddet, kuraklık olaylarının ya kısa süreli olması ya da küçük bir mekansal yayılımı etkilemesi ya da her ikisini birden ifade eder. Yüksek kuraklık şiddeti, daha uzun, daha sık ve daha geniş yayımlı kuraklık olaylarını ifade eder.

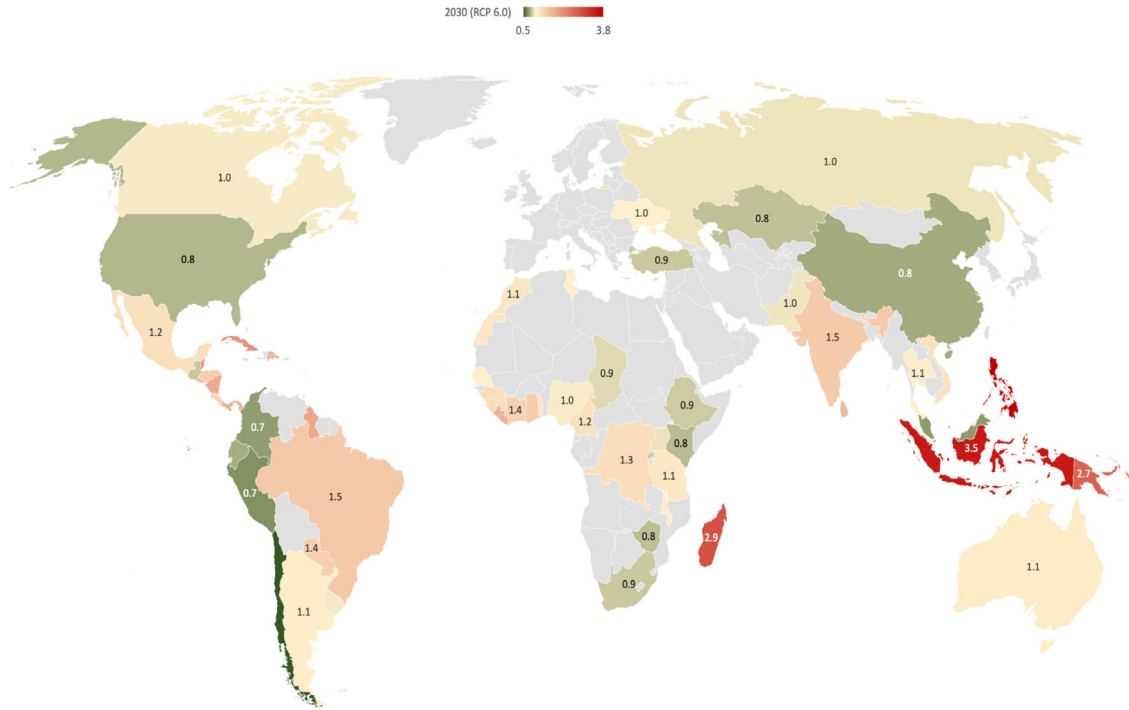
Mevcut iklimde AB'ye yapılan tarımsal ithalatın yaklaşık %93'ü düşük/düşük-orta kuraklık şiddetine sahip yerlerden geliyor. Gerisi (%7) orta-yüksek ve yüksek olarak kategorilendiriliyor. Bu, iklim değişikliği altında önemli ölçüde değişiyor, 2050'de RCP 6.0 konsantrasyon yolu altında AB'nin tarımsal ithalatının yalnızca %18'i düşük kuraklık şiddetine sahip yerlerden geliyor ve ithalatın yaklaşık %44'ü yüksek ve aşırı yüksek kuraklık şiddeti yaşayacak alanlardan geliyor (Şekil.3).

AB'nin sınır ötesi iklim kırılganlığı: Başlıca ithal edilen ürünler. CCVS'ler ürüne göre de değişmektedir (Şekil.4). Bu varyasyon, AB'ye ayrı ayrı ithal edilen sekiz temel ürünün iklim duyarlılığının değerlendirilmesiyle belirlendi: soya fasulyesi, kakao, kahve, yağ palmyesi, ayçiçeği, mısır, zeytin ve şeker kamışı. İthal edilen temel ürünlerden ayçiçeği ve mısır, AB tarafından yapılan ithalat, sırasıyla RCP 6.0 konsantrasyon yolu altında 2050'de 1,13 ile 1,16 arasında en düşük CCVS'lere sahip. Üç ürünün, kakao, şeker kamışı ve palmye yağının ithalatıyla ilgili CCVS'ler kuraklığa karşı yüksek iklim duyarlılığı göstermektedir. Tüm hedef yıllarda (2085 için kakao hariç) her RCP senaryosu için 2,0'ın üzerinde puan almaktadırlar. Ayrıca, zeytin ve kahve ithalatı gelecekte kuraklığa karşı oldukça savunmasızdır (Şekil.4).

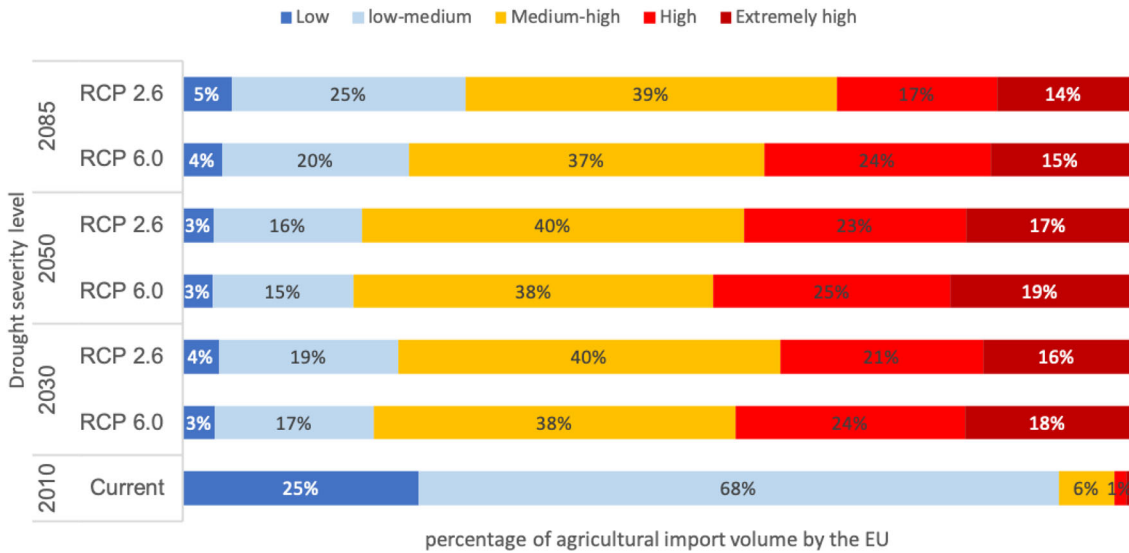
Şekilde5, AB tarafından ithal edilen sekiz temel ürünün mekansal olarak dağıtılmış iklim kırılganlığı haritalarını sunuyoruz. Sonuçların hepsi RCP 6.0 konsantrasyon yolu altında 2050 yılı içindir. Soya fasulyesi, ithal edilen büyük hacimler nedeniyle AB'nin su açısından sınırları dışındaki ülkelere en büyük bağımlılığını oluşturmaktadır. AB'nin soya fasulyesi ithalatının yaklaşık %82'si Brezilya, Arjantin ve Amerika Birleşik Devletleri'nden (ABD) gelmektedir. Bu üç ülke ayrıca AB'nin soya fasulyesiyle ilgili dış su bağımlılıklarında en büyük payı oluşturmaktadır. 2050 yılında soya fasulyesi ithalatının yaklaşık %60'ı kuraklığa karşı yüksek veya çok yüksek kırılganlığa sahip bölgelerden kaynaklanmaktadır. 2050 yılında soya fasulyesi ithalatının kuraklığa karşı kırılganlığının yalnızca %4'ü mevcut iklim koşullarından daha düşüktür. En büyük soya fasulyesi ihracatçısı ülkelerin iklim kırılganlığı puanları: Brezilya için 1,5, Arjantin için 1,4 ve ABD için 1,2 olup orta ila yüksek iklim kırılganlığını göstermektedir.

AB, kakao sektörü için önemli bir bölgedir ve küresel kakao çekirdeği ithalatının yarısından fazlasını karşılamaktadır. Çikolata endüstrisi için %100 kakao ithalatına bağımlıdır. Kakao çekirdeklerinin çoğu, ağırlıklı olarak Batı Afrika'daki gelişmekte olan ülkelere doğrudan AB'ye tedarik edilmektedir. 2017'de, AB kakao ithalatının pazar payının %61'i Fildişi Sahili (%40), Gana (%12) ve Nijerya (%9) tarafından sağlandı. RCP 6.0 kapsamında kakao ithalatının yaklaşık %28'i 2050'de kuraklığa karşı yüksek ila çok yüksek derecede savunmasız yerlerden kaynaklanacaktır. Kakao ithalatının %19'unun kuraklığa karşı duyarlılığı, mevcut iklim koşullarına kıyasla gelecekte daha az olacaktır. 2050'de iklim hassasiyeti puanı 3,9 olan Endonezya ve puanı 3,0 olan Malezya'dan kakao çekirdeği tedariklerinde kuraklık hassasiyeti seviyelerinde önemli bir artış gözlemledik. Fildişi Sahili ve Gana'dan tedarikler nispeten daha düşük hassasiyet puanlarına sahip olup 1,3'tür. Buna karşılık, Güney Amerika kakao tedarikçileri kuraklığa karşı daha az hassas olacaktır. Peru, Kolombiya, Uganda ve Gabon'dan kakao ihracatı iklim değişikliğinden faydalanan ve 2050'de kuraklığa karşı daha az hassas olacaktır.

AB'nin büyük bir kahve pazarı vardır ve küresel kahve tüketiminin neredeyse üçte birini (%30) oluşturur. Küresel olarak, kahve ihracat pazarına, birlikte Avrupa'nın ithalatının yarısını sağlayan Brezilya ve Vietnam hakimdir. Analizimiz, AB'ye yapılan kahve ithalatının iklim değişikliğinin bir sonucu olarak gelecekte artan kuraklıklardan önemli ölçüde etkileneceğini göstermektedir. %44



Şekil 2. RCP 6.0 konsantrasyon yolu altında 2050 yılında ihracatçı ülke başına AB tarım-gıda ekonomisinin kuraklığa karşı sınır ötesi iklim kırılganlığı skoru (CCVS). Şekil yalnızca AB'nin toplam yeşil sanal su ithalatının %0,1'inden fazlasını oluşturan ülkeleri temsil eder. Bu ülkeler birlikte, AB'nin toplam dış yağış bağımlılığının %99'undan fazlasını temsil eder. Yeşilden kırmızıya renkler artan sırada CCVS'leri gösterir.



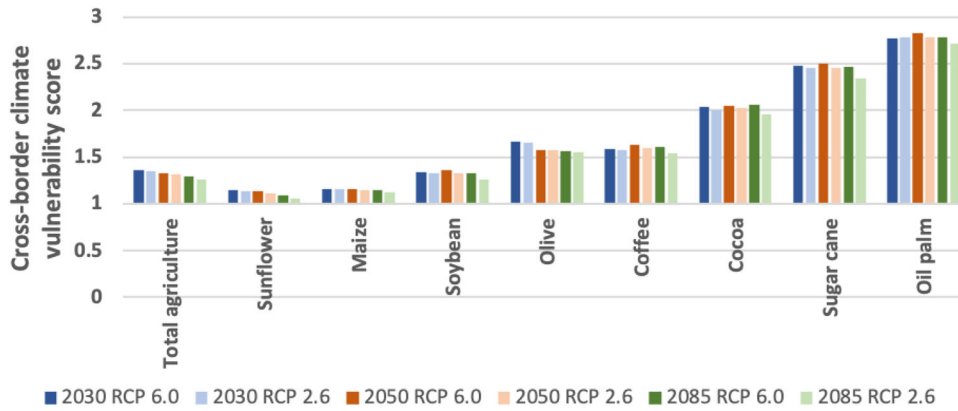
Şekil 3. Farklı iklim senaryoları ve zaman dilimleri için ihracat noktalarındaki kuraklık şiddeti seviyelerine göre kategorize edilmiş AB'ye göre tarımsal ithalat hacminin yüzdesi. Mavi ve kırmızı renkler kuraklığın şiddet seviyelerini göstermektedir.

Kahve ithalatının tedarik lokasyonlarının iklim değişikliği nedeniyle kuraklığa karşı oldukça savunmasız olacak. Kahve ithalatının yalnızca %28'inin kırılganlığı mevcut iklim koşullarına kıyasla daha az olacak. İncelenen her yılda, Avrupa'nın ana tedarikçileri olan Brezilya ve Vietnam'dan yapılan kahve ithalatının kırılganlık seviyesi yüksek olup iklim kırılganlık puanları 1,9'dan fazladır. Endonezya'dan yapılan tedarikler de büyük ölçüde etkilenecek ve kırılganlık puanları yaklaşık 4,5. Ancak Kolombiya, Uganda, Peru, Etiyopya ve Kenya'dan yapılan ithalatlar iklim değişikliği nedeniyle kuraklığa karşı daha az savunmasız hale gelecektir.

Endonezya, Malezya ve Tayland, AB palmiye yağı ithalatının başlıca kaynaklarıdır. 2017'de, AB ithalatının dörtte üçüne yakını

palmiye yağının bu üç Asya ülkesinden geldiği görüldü. AB'nin Endonezya'dan tedariklerinin kuraklığa karşı oldukça savunmasız olduğunu ve iklim savunmasızlık puanının 3,0'ın üzerinde olduğunu görüyoruz. Diğer küresel tedarikçiler, Papua Yeni Gine ve Brezilya da benzer şekilde yüksek puanlara sahipti. Yine de AB'nin diğer büyük palmiye yağı tedarikçileri, Malezya ve Tayland, iklim değişikliğinden orta düzeyde etkilenecek ve iklim savunmasızlık puanları 1,25 ile 1,5 arasında olacak. Genel olarak, palmiye yağı ithalatının %61'i kuraklığa karşı oldukça savunmasız hale gelecek.

AB, önemli bir küresel ayçiçeği tohumu üreticisidir. Ancak, pazar talebi üretim hacmini aşmaktadır. Bu nedenle, büyük miktarlarda ayçiçeği tohumu ithal etmektedir.



Şekil 4. AB'nin dış yağış bağımlılığını açıklayan, AB'ye ithal edilen en önemli sekiz ürüne ilişkin sınır ötesi iklim kırılganlığı puanları. Çubukların renkleri farklı yıl ve RCP kombinasyonlarını göstermektedir; 2030 RCP6.0, 2030 RCP2.6, 2050 RCP6.0, 2050 RCP2.6, 2085 RCP6.0, 2085 RCP2.6.

Ukrayna, Arjantin, Rusya ve ABD. AB'nin ayçiçeği ile ilgili dış yağış bağımlılığı yaklaşık %48'dir. Analizimiz, AB'nin ayçiçeği tohumu tedarikçilerinin neredeyse tamamının kuraklığa karşı düşük bir iklim hassasiyetine sahip olduğunu, Bolivya ve Paraguay hariç, göstermektedir.

AB, talebi karşılamak için ihtiyaç duyduğu mısırın çoğunu üretiyor; yalnızca %30'u AB dışından ithal ediliyor ve esas olarak sığır üretimi için yem olarak kullanılıyor. AB'ye mısır ihraç eden başlıca ülkeler Ukrayna, Brezilya ve Arjantin'dir. Tüm önemli mısır ihraç eden ülkelerin iklim hassasiyeti düşüktür. Brezilya'dan yapılan ihracat, iklim değişikliği nedeniyle kuraklığa karşı daha az hassas hale gelecektir. Mısır ithalatının yalnızca yaklaşık %20'si 2050'de kuraklığa karşı oldukça hassas bölgelerden kaynaklanacaktır (RCP6.0).

AB zeytinlerinin çoğunu kendisi yetiştiriyor; sadece %8'ini sınırları dışından ithal ediyor. Zeytinle ilgili dış yağış bağımlılığı yaklaşık %13. AB zeytin bazlı ekonomisi için zeytin ithalatına bağımlı olmasa da zeytin ithalatı iklim değişikliğine karşı en savunmasız olanlardan biri. Türkiye, Tunus ve Fas gibi büyük zeytin ihracatçısı ülkelerin iklim savunmasızlığı, iklim değişikliği altında kuraklığa karşı oldukça savunmasız (Tunus ve Türkiye'den yapılan ithalatların iklim savunmasızlığı puanları 1,5, Fas'ınki ise 1,6 olarak hesaplanıyor).

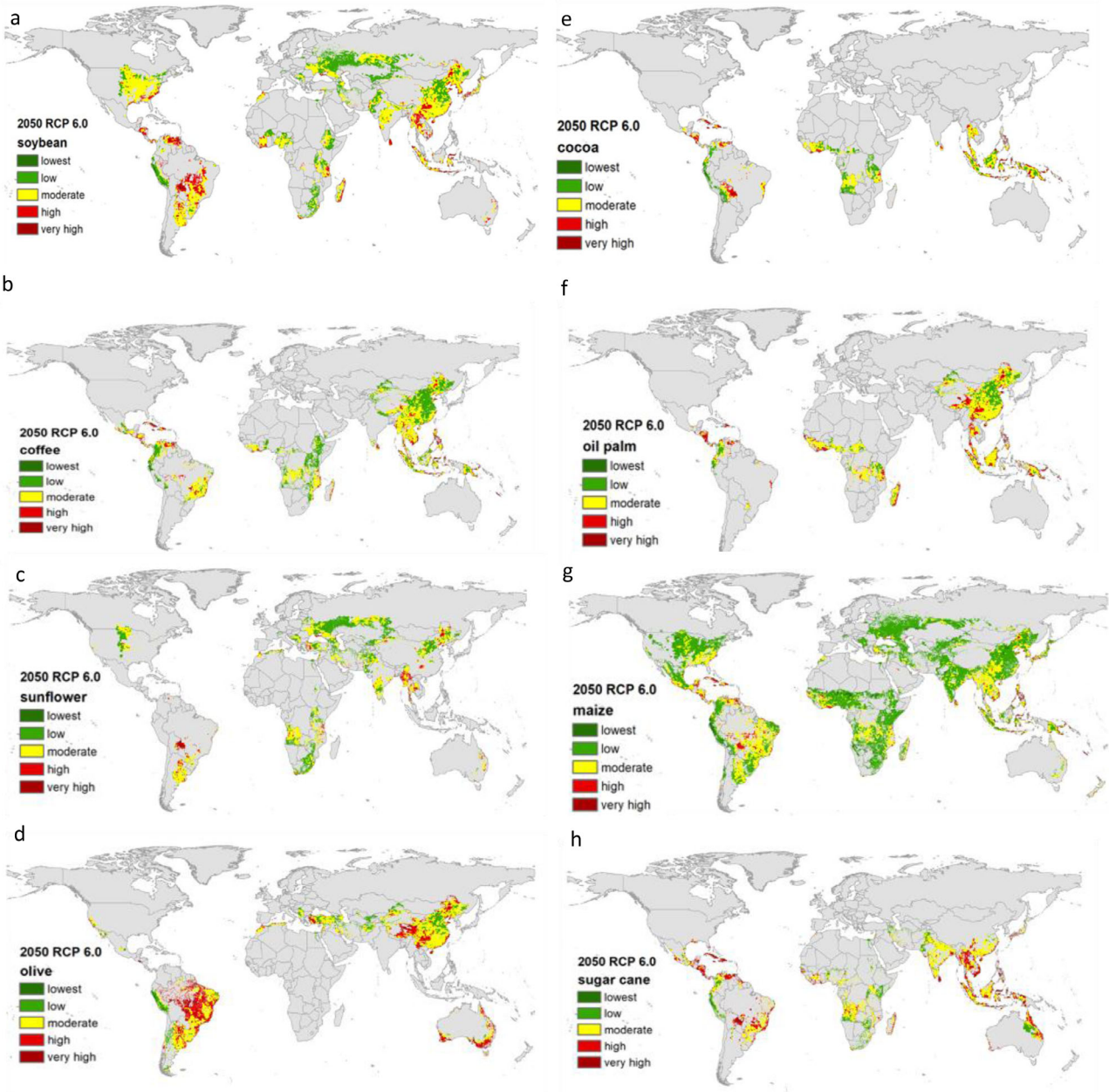
AB ham şeker kamışı üretmiyor; hepsi diğer ülkelerden ithal ediliyor. Şeker kamışı (hem ham hem de işlenmiş formda) çoğunlukla Brezilya, Mauritius, Küba, Guyana, Fiji ve Hindistan'dan geliyor. Analizimiz, tüm şeker kamışı tedarikçilerinin iklim değişikliği altında kuraklığa karşı çok savunmasız olduğunu, Fiji hariç iklim savunmasızlık puanlarının 2,0'dan yüksek olduğunu gösteriyor. Şeker kamışı ithalatının %73'ünden fazlası 2050 yılına kadar kuraklığa karşı çok savunmasız olacak ve ithalatın yalnızca %6'sının savunmasızlığı düşük olacak. Bu sonuç, şeker kamışını AB tarafından diğer önemli ithal ürünler arasında iklime karşı en savunmasız ithal edilen emtia haline getiriyor.

Tartışma

Bu çalışmanın temel bulgusu, AB ekonomisinin iklim değişikliği nedeniyle sınırları dışında kuraklığa karşı oldukça savunmasız olmasıdır. Analiz, uluslararası ticaret yoluyla ürün akışının, küresel tedarik zincirleri aracılığıyla hammaddede kullanan tüm sektörlerin su kaynaklarına ve orijinal üretim bölgelerindeki aşırı hava olaylarına ve iklim değişikliğine bağlı olduğu anlamına geldiğini göstermektedir. Aşırı hava olaylarının yoğunluğu ve büyüklüğü değişen bir iklim altında değişeceğinden, AB'deki bu dış ürün akışına bağımlı sektörler, AB'nin tarımsal ithalatları için yaptığımız çalışmada gösterildiği gibi aşırı hava olaylarına karşı daha savunmasız hale gelecektir.

Coğrafi bir bölge için yapılan hemen hemen tüm iklim hassasiyeti çalışmaları, öncelikle bölgenin sınırları içindeki iklim etkilerine odaklanır. Sınır ötesi hassasiyetler bilimsel literatürde veya iklimle ilgili politikalarda ve stratejilerde tam olarak ele alınmamıştır. Çalışmamızda sunulan sonuçlar ve analizler, sınır ötesi iklim hassasiyetleri de dahil olmak üzere iklim hassasiyeti çalışmalarının odağını yeni bir adıma taşıyabilir. Çalışmamız, AB'deki et ve süt ürünleri, çikolata (kakao), kahve, gıda ve palmiye yağına dayalı kozmetik üretimi gibi bazı sektörlerin kuraklıkla ilgili iklim hassasiyetlerinin çoğunlukla AB sınırlarının içinde değil, ötesinde yattığını göstermektedir. Bunun iyi bir örneği palmiye yağıdır. Çoğunlukla AB'de gıda, kozmetik ve biyoyakıt üretimi için kullanılan palmiye yağının, AB'ye yapılan ithalatının iklim değişikliği altında kuraklığa karşı oldukça hassas olduğunu gösteriyoruz. İklim Uyum Stratejisi ve AB'nin tarımsal ticaret politikası gibi AB çapındaki iklimle ilgili stratejiler ve pan-Avrupa ve bölgesel düzeydeki uluslararası kalkınma stratejileri, değerlendirmemizin sonuçlarından faydalanabilir. AB ekonomisinin karşılaşılabileceği olumsuz sonuçları önlemek için bu sınır ötesi iklim zaaflarını sektörel bazda daha da ele alabilirler. AB ayrıca ticaret ortaklarıyla ikili ilişkiler geliştirirken çalışmamızın sonuçlarını kullanabilir.

Çalışmamızın diğer önemli sonuçlarından biri de AB'nin tarımsal ithalatının kuraklığa karşı hassasiyetinin önümüzdeki yirmi ila otuz yıl içinde (2030'a kadar, yani önümüzdeki otuz yılı temsil eden) şeker kamışı, kakao, kahve ve palmiye yağı gibi bazı önemli ithal ürünler için keskin bir şekilde artacağıdır. Bu, olası olumsuz etkileri önlemek için acil eylem gerektiğini göstermektedir. Karar alma süreçlerinin her düzeyinde uyum gereklidir ve diğer bölgelerden kaynak sağlama ve yeni pazar alanlarına yatırım yapma, belirli bölgeleri kırılganlıklarını azaltma çabalarıyla destekleme ve böylece kuraklığa karşı daha dayanıklı hale gelme veya alternatif birincil ürünler kullanma gibi seçenekler vaka bazında değerlendirilmelidir. Örneğin, çok uluslu bir şirket tedarikçileriyle birlikte çalışmayı ve AB sınırları dışındaki üretim yerlerinde kuraklığa karşı dayanıklılık oluşturmaya yatırım yapmayı seçebilir veya tedarik zinciri pazarlarını gelecekte kuraklığa karşı hassasiyetlerin daha düşük olması beklenen yerlere kaydırmayı düşünebilir. Önceki çalışmalar, çevresel baskıları ve sınır ötesi zaafları azaltmak için ithal soya fasulyesinden ziyade AB içinde yerel olarak yetiştirilen yem kaynağı alternatiflerinin potansiyel kullanımını göstermiştir.¹¹⁻¹³ Bu, daha ileri politika formülasyonunda da dikkate alınabilir. İki farklı konsantrasyon yolundaki (RCP 2.6 ve RCP 6.0) kırılganlıkları karşılaştırarak, çalışmamız tüm ürünler için ve çoğu için RCP 6.0'dan RCP 2.6'ya doğru iklim kırılganlıklarının azaldığına dair net bir eğilim ortaya koymaktadır.



Şekil 5. RCP 6.0 konsantrasyon yolu kapsamında 2050 yılında AB'nin kuraklığa karşı ithal edeceği başlıca tarım ürünlerinin iklim kırılganlığı düzeyi haritaları. Sol sütun yukarıdan aşağıya: soya fasulyesi (A), Kahve (B), ayçiçeği (C), zeytin (D). Sağ sütun yukarıdan aşağıya: kakao (e), yağ palmiyesi (F), mısır (G), şeker kamışı (H). Yeşilden kırmızıya doğru renkler, en düşükten en yükseğe kadar olan kırılganlık seviyelerini ifade eder.

ihracat yerleri. Bu, iklim değişikliğini hafifletmek ve sera gazı emisyonlarını mümkün olduğunca hızlı ve önemli ölçüde azaltmak için küresel çabaların önemini vurgular.

Analizimiz, tarımın (hem AB'nin içinde hem de dışında) iklimsel kırılganlıklarını değerlendirirken her bir mahsulün ve üretim yerinin bir şebeke ölçeğinde analiz edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bunun nedeni, her bir mahsulün kırılganlığının farklı olmasıdır önemli ölçüde: ayçiçeği büyüklüğü ve yoğunluğu için düşük bir ithalatında; orta düzeyde bir iklim hassasiyeti vardır soya fasulyesi ve kahve, kakao ve palmiye yağı ithalatı için yüksek ila çok yüksek bir kırılganlık. Kırılganlıklar ayrıca ihracat konumuna göre de farklılık gösterir. Örneğin, Endonezya, Brezilya ve Vietnam'dan gelen kahve ithalatları iklim değişikliği nedeniyle kuraklığa karşı oldukça kırılgan, Kolombiya, Uganda, Peru, Etiyopya ve Kenya'dan gelenler daha az kırılgan olacaktır. Sonuç olarak, aşırı hava olaylarına karşı iklim kırılganlıklarını her bir

mahsul bazında değil, bir bütün olarak tarım sektörü bazında.

Ürettiğimiz anahtar ithal mahsuller için şebeke tabanlı kırılganlık haritaları, belirli bir ülkedeki konum bazında kırılganlık seviyelerinde belirgin farklılıklar göstermektedir. Bu, özellikle ABD, Brezilya ve Çin gibi büyük ölçekli ihracatçı ülkeler için geçerlidir.

Değerlendirmemizde iklim duyarlılığındaki belirleyici faktör, hem kuraklık koşullarındaki hem de iklim değişikliğindeki değişikliklerdir. Üretim yerlerindeki meteorolojik sürücüler. AB'nin SSP2 senaryosunda önemli ölçüde değişmeyen ürün ithalat talebindeki değişiklikler açısından sosyoekonomik sürücülerin etkisini ifade ettik. Ancak, 2030 ve 2050 ile karşılaştırıldığında 2085'teki kırılganlık seviyelerindeki düşüş, AB'deki nüfusun azalması ve buna bağlı olarak ürün talebindeki düşüşle açıklanabilir. AB'deki nüfus değişiklikleri gibi sosyoekonomik sürücüler belirleyici bir faktör olmasa da

Çalışmamızda, bunlar ihracat yerlerinde gıda için rekabet açısından olabilir. Örneğin, AB'nin soya fasulyesi ithalatı, emtiaya yönelik iç talep artarsa etkilenebilir ve rekabet yaratabilir. Bu, emtia fiyatlarının artmasına ve emtia ticaretinde daha fazla kısıtlamaya yol açabilir. Bu çalışma, AB'nin ithalat bağımlılığı ve kırılganlığı üzerindeki bu tür ek baskıları dikkate almaz.

Çalışmanın sonuçları ayrıca iklim değişikliğine uyum sağlama kapasitelerinin ABD, Endonezya ve Malezya'da gözlemlendiği gibi CCVS'lerdeki kırılganlıkları azaltmada önemli bir rol oynayabileceğini ortaya koydu. Gelecekte kuraklık şiddetinin daha yüksek olmasına rağmen, bu ülkelerden yapılan ithalatlar için kırılganlık puanlarının daha yüksek iklim değişikliğine uyum sağlama kapasiteleri nedeniyle daha düşük olduğu tahmin ediliyor. Ancak, soya fasulyesi (Brezilya) ve kakao (Fildişi Sahili ve Gana) gibi AB'nin tarımsal ithalatının çoğu, iklim değişikliğine uyum sağlama kapasitesi düşük bölgelerde üretiliyor. Bu ülkelerde iklime daha dayanıklı üretime doğru çalışmak, AB'nin sınır ötesi iklim kırılganlıklarını azaltmak için anlamlı bir adım olabilir.

Bu çalışmada sunulan sonuçlar, bir bölgenin, AB'nin, sınır ötesi kırılganlıklarının daha derin ve daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlama yolunda atılan ilk adımlar olarak görülebilir. Bu nedenle, analizin sonuçları etkileyebilecek ve gelecekteki çalışmalarda daha fazla ele alınabilecek bazı sınırlamaları vardır. İlk olarak, iklim değişikliğinin potansiyel etkilerini yalnızca kuraklık şiddetine, toprak nem anomalisine bakarak basitleştirdik. Büyüme mevsiminin uzunluğu, ısı stresi, su kıtlığı, don, seller ve potansiyel CO₂ gübrelemesi gibi diğer stres faktörleri gibi birkaç faktör daha vardır. Bu konu hakkında gelecekteki araştırmalar, sınır ötesi iklim kırılganlıklarını belirlerken birden fazla stres faktörünü ve diğer faktörleri içerebilir. Bir diğer önemli sınırlama, analizde yalnızca mevcut ticaret modellerini ve mevcut ürün su talebini dikkate almış olmamızdır. Sonuç olarak, analizimiz gelecekte ani üretim kayıpları veya fiyat değişiklikleri nedeniyle bölgeler arasında meydana gelebilecek üretim kaymalarını dikkate almamaktadır. Ürünlerin su talebini sabit tutarak, iklimin ürün su kullanımı ve buharlaşma talebi üzerindeki etkilerini dikkate almadık. Bu, iklim etkilerinin basitleştirildiği anlamına gelir. Bitkilerin kuraklık koşullarına karşı hassasiyeti değişebilir, çünkü iklim değişikliği bitki üretimi için daha yüksek veya daha düşük su talebine yol açabilir.

Modeller, çeşitli senaryolar altında ve bütünsel bir şekilde gıda sistemlerindeki kalkınma yollarını keşfetmek için giderek daha fazla kullanılıyor³⁸ Çalışmamız iklim değişikliği kapsamındaki ticaret boyutu ve kuraklık kırılganlıklarına odaklandı. Nexus ve sistem yaklaşımlarının Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'ne (SDG'ler) ulaşma yolunda ilerleme için elzem olduğu düşünülmektedir³⁹ Bunun için yaklaşımımız ve sonuçlarımız, tarımsal değer zincirlerinin kırılganlığını değerlendirirken diğer iklimle ilgili tehlikelerle (seller, zararlılar, hastalıklar vb.) tamamlanabilir.

Ürünler. Bu sistem düşüncesi, iklim adaptasyonu ve sınır ötesi güvenlik açıklarına ilişkin sürdürülebilir çözümler bulmak için önemli olabilir⁴⁰.

İklim değişikliği, Güneydoğu Asya, Sahra Altı Afrika ve Güney Amerika gibi dünyanın birçok yerinde artan kuraklığa yol açıyor. Bunun AB ekonomisi üzerinde etkileri var çünkü tükettiği veya kullandığı malların çoğu bu bölgelerde üretiliyor ve iklim kaynaklı kuraklık şiddeti nedeniyle risk altında olacaklar. Bu, AB ekonomisini iklim değişikliği nedeniyle sınırlarının çok ötesinde kuraklığa karşı oldukça savunmasız hale getiriyor. Çalışmamız, AB ekonomisinin sınırları dışındaki su kaynaklarına olan bağımlılıklarını haritalandırdı ve sınır ötesi iklim kırılganlıklarını nicelleştirdi. AB'nin tarımsal ithalatının %44'ünden fazlasının iklim değişikliği nedeniyle gelecekte kuraklığa karşı oldukça savunmasız hale geleceğini bulduk. Tarımsal ithalatın üretim yerlerindeki kuraklık şiddeti 2050 yılında yaklaşık %35 artacak (RCP 6.0 durumu). Bu, özellikle Brezilya, Endonezya, Vietnam, Tayland, Hindistan, Türkiye ve Honduras'tan gelen ithalatlar için geçerlidir. İklim değişikliği bu yerleri olumsuz etkileyecek olsa da, bazı ihracat yerleri yağış desenlerindeki değişikliklerden faydalanacaktır. Örneğin, Rusya, Nijerya, Peru, Ekvador, Uganda ve Kenya'dan yapılan ithalatlar iklim değişikliği nedeniyle kuraklığa karşı daha az savunmasız olacaktır.

Çalışmamız ayrıca yakın gelecekte, dünyanın diğer bölgelerinde artan kuraklık nedeniyle AB'ye belirli ürünlerin tedarikinin kesintiye uğrayabileceği sonucuna varıyor. Kahve, kakao, şeker kamışı, yağ palmyesi ve soya fasulyesi AB tarafından ithal edilen iklim açısından en savunmasız tarım ürünleridir. Bu ithalatın büyük bir kısmı gelecekte kuraklık şiddetinin yüksek olduğu bölgelerden gelecektir. AB'nin suyla ilgili iklim etkilerine karşı savunmasız bölgelerde üretilen mallara olan ekonomik bağımlılığı, hükümet politikalarında ve iş stratejilerinde dikkate alınabilir. Güneydoğu Asya ve Güney Amerika gibi bazı bölgelerin stratejik önemi, su kaynakları üzerindeki potansiyel iklim kaynaklı etkiler ve bu bölgelerden sürekli bir emtia tedarikine duyulan ihtiyaç açısından AB için artacaktır. Kuraklığa dayanıklılığı artırma ve sürdürülebilir, verimli ve adil su kullanımını sağlamak için su yönetişimini güçlendirme gibi yatırımlar, AB ekonomisinin sınır ötesi iklim savunmasızlığını azaltabilir. AB'nin politikaları ve üreticileri, sınır ötesi iklim hassasiyetlerini azaltmak için soya fasulyesi dışındaki alternatif yerel olarak yetiştirilen yem kaynakları gibi alternatif üretim seçenekleri de bulabilirler.

Yöntemler

Bu çalışmada kullanılan zafiyet yaklaşımı Turner ve arkadaşlarının bir iddiasından kaynaklanmaktadır.⁴¹ Bu kırılganlık, bir sistemin belirli bir baskı veya baskıların bir kombinasyonu nedeniyle stres yaşama derecesi tarafından belirlenir. AB ekonomisinin sınır ötesi iklim kırılganlığını ifade ettik (V_{AB}) duyarlılıktaki değişimin bir fonksiyonu olarak (4S), maruziyetteki değişiklik (4D) hidrolojik

Tablo 1 Bu çalışmada sanal su ticareti senaryo modelinde kullanılan sürücüler ve varsayımlar.

Sürücü	Elementler	Gelecekteki koşullar
Nüfus artışı ³⁶	Nüfus büyüklüğü	Orta doğurganlık (SSP2)
Ekonomik büyüme ³⁶	Gelir düzeyleri	Orta, mevcut eğilim SSP2
	GSYİH büyümesi	
Tüketici tercihleri ⁴²	Diyetler	Güncel eğilim
	Elyaf talebi ⁴⁸	Güncel eğilim
	Gıda dışı talep ⁴⁸	Güncel eğilim
Üretim ve ticaret ⁴²	Üretim ve ithalat oranları	A1B üretimi ve T1 ticaret modellerine dayalı olarak
Teknoloji geliştirme ⁴²	Su verimliliği	Mevcut
Politika değişikliği ⁴³	Ticaret politikası	Zayıf küreselleşme
	Çevre politikası	Hem reaktif hem de proaktif
	Biyoyakıt politikası	Akım

farklı iklim koşullarında aşırılıklar ve uyum kapasitesi (A):

$$VAB \frac{1}{4} 4S4E^* A$$

AB ekonomisinin sınır ötesi iklimsel kırılganlıklarını ölçmek için, öncelikle iklim değişikliği altında kuraklığa karşı duyarlılıktaki değişimi (yani AB tarafından yapılan yeşil sanal su ithalatındaki değişimi) analizin seçilen yılları için tahmin ettik: 2030; 2050; ve 2085. Bunu, Erzin ve Hoekstra tarafından geliştirilen sanal su ticareti senaryosu modeline dayalı olarak, nüfus artışı; ekonomik büyüme; üretim/ticaret kalıpları; ve tüketim kalıpları (örneğin diyet tercihleri, biyoenerji kullanımı, vb.) gibi bir dizi değişim sürücüsüne dayalı küresel bir talep-üretim senaryosu oluşturarak yaptık.^{42,43}(Masa1). Bunun için, ürünlerin yetiştirildiği yerlerdeki yeşil su ayak izinin değişmeyeceği varsayımıyla, Paylaşılan Sosyoekonomik Yol 2 (SSP2) özelliklerini kullandık.

Bir sonraki adım, toplam tarımsal ithalata ek olarak, hangi ithal ürünlerin hassasiyet değerlendirmesi için temel olarak kullanılacağını belirlemektir. Yeşil sanal su ithalat hacmi AB'nin toplam yeşil sanal su ithalatının %2'sinden fazla olan ürünler, bu çalışmanın hedef yılları için temel ithal ürünler olarak belirlendi. Temel ithal ürünlerin üretim yerlerini 0,5 × 0,5 derecelik bir ızgara ölçeğinde belirleyip haritaladıktan sonra, iki Temsili sera gazı Konsantrasyon Yolu (RCP) altında üretim yerlerinde kuraklık şiddetine maruz kalmalarını tahmin ettik: RCP 2.6 ve RCP 6.0. Bunu, dört Genel Dolaşım Modeli (GCM) ve dört Küresel Hidrolojik Model (GHM) (4 GCM × 4 GHM) topluluğunu kullanarak yaptık. Model çıktılarını istatistik gruplarına (ortalama, medyan, üst/alt sınır, örneğin Q25 ve Q75) dönüştürdük ve sonuçlarımızı sunmak için medyan değerlerini kullandık.

RCP 2.6, literatürde antropojenik iklim değişikliğini sınırlamak için en iyi durum olarak tanımlanmıştır. Küresel ısınmanın 2 santigrat derecenin altında sınırlandırıldığı bir senaryoyu temsil eder. RCP 2.6, PBL Hollanda Çevre Değerlendirme Ajansı'nın IMAGE modelleme ekibi tarafından geliştirilmiştir. Bu bir zirve ve düşüş senaryosudur; radyasyon zorlama seviyesi yaklaşık 3,1 W/m değerine ulaşır2010 ortalarına doğru 2,6 W/m'ye geri döner2100 yılına kadar. Bu tür radyasyon zorlama seviyelerine ulaşmak için, sera gazı emisyonları ve dolaylı hava kirleticisi emisyonları zamanla önemli ölçüde azaltılır^{44,45}.

Buna karşılık, RCP 6.0, GHG konsantrasyonlarının 2060 yılına kadar iki katına çıktığı ve ardından önemli ölçüde düştüğü ancak mevcut seviyelerin çok üzerinde kaldığı bir senaryoyu temsil eder. RCP 6.0, Japonya'daki Ulusal Çevre Çalışmaları Enstitüsü'ndeki (NIES) AIM modelleme ekibi tarafından geliştirilmiştir. RCP 6.0'a göre sıcaklık projeksiyonları, sıcaklıkların 2100 yılına kadar yaklaşık 3–4 °C arttığı sürekli küresel ısınmayı içerir. Bu bir stabilizasyon senaryosudur; toplam radyatif zorlama, GHG emisyonlarını azaltmaya yönelik bir dizi teknoloji ve stratejinin uygulanmasıyla, aşırıya kaçmadan 2100 yılından kısa bir süre sonra stabilize olur^{46,47}.

Hassasiyet: Yeşil sanal su ithalatı.Bu çalışmada ithal edilen bir ürüne ilişkin hidrolojik uç noktalara karşı duyarlılığı tanımladıkPyl içinsin (S)_{py} eşit olarak yeşil sanal su ithalatı (VWI)_{AB;yeşil;py;m} cinsinden3/yıl) AB tarafından yıldasen:

$$S_{py} \frac{1}{4} VWI_{AB;yeşil;py}$$

AB'nin yeşil sanal su ithalatı (VWI)_{AB, yeşil,p, y}, m cinsinden3/yıl, ürün içinP, ürünle ilgili yeşil sanal su ithalatının toplamıdırPAB dışındaki tüm ülkelerden (AB dışı) tüm AB Üye Devletleri tarafından yldasen:

$$VWI_{AB;yeşil;py} \frac{1}{4} \sum_{ve \frac{1}{4} 1} TAB_{p;e;y} WF_{yeşil;p;e;y}$$

TAB_{p,e,y} ithal edilen ürünün fiziksel miktarıdırP ((ton/yıl) AB tarafından ihracatçı ülkedenveyıl içindesen,ve WF_{yeşil,p,e,y} yeşil su ayak izi (m³/ton) ithal edilen ürününPihracatçı ülkedeveyıl içindee.Yeşil su ayak izi hacimleri Erzin ve ark.'dan alınmıştır.⁸.

İthal edilen ürünün fiziki miktarı, TAB_{p,e;y}(ton/yıl), itibaren ihracatçı ülkeveAB'ye göre hesaplama şu şekilde yapılır:

$$TAB_{p;e;y} \frac{1}{4} TAB_{p;y;Fe;p}$$

NeresiTAB_{p,y}Ürünle ilgili ithalatın toplam hacmiPyl içineveFe_pülkenin pay oranıdırve,aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$Fe_{p;py} \frac{1}{4} p \frac{ve}{Bölüm}$$

$$Ep \frac{1}{4} \sum_{ve \frac{1}{4} 1} AB \text{ dışı}$$

vePürünün ithalat hacmi nedirPülkenenveFePAynı ürünün 2010 yılı için hesaplanan toplam ithalat hacmidir (2005-2013 ortalaması).

Ürünün toplam ithalat hacmiPtoplam arasındaki fark olarak hesaplanır talep (D)_{AB;py}, ton/yıl olarak)Ürün içinPAB tarafından ve ürünün üretimiPAB'de (PR)_{AB;py}(ton/yıl cinsinden)yılсен:

$$TAB_{py} \frac{1}{4} DAB_{py} - Halkla \text{ İlişkiler} AB_{py}$$

AB'nin tarım ürünlerine olan talebi.Bir tarımsal ürünün talebiPAB tarafından,DAB_{py}yıl içindeveuç bileşeni vardır: (i) talep

Gıda tüketimiP_{F;AB;py}; (ii) gıda dışı ürünlere (lif, yem ve biyoyakıt) olan talep, P_{nF;AB;py}; ve (iii) AB'nin tarımsal gıda ihracatına olan talebi,P_{D;AB;py}:

$$DAB_{py} \frac{1}{4} P_{F;AB;py} \frac{1}{4} P_{nF;AB;py} \frac{1}{4} P_{D;AB;py}$$

Gıda talebiP_{F;AB;py}, ton/yıl olarak, AB'ye göre ürünle ilgiliPyl içineveşöyle tanımlanmaktadır:

$$P_{F;AB;py} \frac{1}{4} pop_{AB;ve} \frac{1}{4} kcal_{AB;p; y} \frac{1}{4} f \frac{1}{4} \frac{kcal}{kg}$$

pop AB nerede;veAB'nin nüfusu yıl olarak nedirve kcal AB;p; y Ürünebağılı kişi başına düşen kilokalori alımıPAB'de yıldaef katsayısıkilogramürünün kilogramı başına kilokalori miktarıdırP.Kilokalori değerleri Ürün için birim ürün kütlePyl içindeveErzin ve Hoekstra'dan elde edilmiştir^{42,43}Uluslararası Uygulamalı Sistemler Analizi Enstitüsü'nden (IIASA) SSP2 popülasyon projeksiyonlarını kullandık³⁶.

Tarımsal ürünün gıda dışı tüketimi, S_{nF;AB;py}, ton/yıl, AB'de bir yıldırveşöyle tanımlanmaktadır:

$$P_{nF;AB;py} \frac{1}{4} pop_{AB;y} \frac{1}{4} fc_{AB;p} \frac{1}{4} ve \frac{1}{4} 2010$$

NeresiFc_{AB;p} ürüne olan kişi başına düşen talep nedirPAB'de 2010 yılında gıda dışı amaçlar için FAO'dan elde edildi⁴⁸.

AB'nin ihracat sektörüne yönelik tarımsal gıda talebinin, gıda ve gıda dışı talebin toplamına orantılı olduğu varsayılmaktadır ve şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$PA_{AB;py} \frac{1}{4} \frac{PD_{AB;p;ve \frac{1}{4} 2010}}{PF_{AB;py} \frac{1}{4} 2010 + PD_{AB;p;ve \frac{1}{4} 2010}} \frac{1}{4} PF_{AB;py} \frac{1}{4} P_{nF;AB;py} \frac{1}{4} P_{D;AB;py}$$

NeresiPD_{AB;py}2010ürünün ihraç edilen miktarıdırPAB tarafından 2010 yılında (2005-2013 ortalaması), Uluslararası Ticaret Merkezi veritabanından elde edilmiştir^{49,50}.

AB'de tarım ürünlerinin üretimi.Ürünün beklenen üretimiP (AB'de (ton/yıl) PR_{AB;py}, çarpımı olarak hesaplanır emtia üretim payıF_{P;AB;ve} ürünün toplam üretimiPdünyada, PR_{py}:

$$Halkla \text{ İlişkiler} AB_{py} \frac{1}{4} Halkla \text{ İlişkiler} F_{AB;ve}$$

AB'nin ürün bazında emtia üretim paylarıPyl içineve Erzin ve Hoekstra'dan alınmıştır⁴³Ürün için küresel üretim hacimleri P (Halkla İlişkiler_{py}) aynı çalışmadan alınmıştır, daha sonra küresel nüfusa göre ayarlanmıştır SSP2 tahminleri.

Maruziyet: İklim değişikliğine bağlı kuraklığın şiddeti.Maruziyeti ölçmek için, Sheffield ve Wood'un metodolojisini izleyerek 0,5 × 0,5 derecelik ızgara ölçeğinde kuraklık şiddetinin mekansal dağılımını tahmin ettik⁵¹Yazarlar kuraklık oluşumunu anormal derecede düşük toprak neminin uzun bir dönemi ve ardışık aylar dizisi olarak tanımladılar.Dtoprak nem kantil değerleri ile,, QEvet,seçilen bir eşikten daha az,QoððP.Burada, ortalama olarak belirli bir ay için her beş yılda bir meydana gelen koşulları yansıtan %20'lik eşik değerini seçtik. Kuraklık şiddeti, SE, daha sonra süreye göre hesaplanırD, yoğunlukBEN,ve SE'ye bağlı olan şiddetQoEvet:

$$Güney DoğruDxI$$

$$BEN \frac{1}{4} D \frac{1}{4} \frac{1}{4} T_{suD-1} \frac{1}{4} T_{T1} \frac{1}{4} \sum_{QoððP} - Q_{TððP}$$

Yoğunluk kuraklığın süresi boyunca ortalama büyüklüğü, şiddet ise eşğin altındaki zamanla bütünleşmiş açığın %ay birimiyle ifadesidir.

2006'dan 2009'a kadar kuraklığın şiddetini, dört GHM'nin aylık toprak nem çıktılarını kullanarak 0,5 × 0,5 derecelik mekansal çözünürlükte tahmin ettik: H08⁵², LPJmL⁵³ PCR-GLOBWB^{54,55}ve WaterGAP²⁵⁶Her bir model veya topluluk üyesi için kuraklığın şiddetini 2030, 2050 ve 2085 yıllarında merkezlenen 30 yıllık periyotlarda hesapladık.

İklim etkilerini değerlendirmek için dört GCM'nin çıktılarını kullandık: GFDL-ESM2M; HadGEM2-es; IPSL-CM5A-LR; ve GHM'lere zorlama olarak kullanılan MIROC5. Bu GCM'ler Hempel ve diğerlerinin ardından önyargıya göre düzeltilti.⁵⁷ve Lange ve ark.⁵⁸Bunlar, ISIMIP2b altında kurulan iki GHG konsantrasyon yolu (düşük: RCP 2.6, yüksek: RCP 6.0) ve bir endüstri öncesi kontrollü çalışmayı temsil ediyordu.⁵⁹çerçeve. Topluluk sonuçları topluluk istatistikleri için bir girdi olarak kullanıldı. Topluluktan medyan değerleri temsil eden kuraklık şiddeti değerlerini kullandık.

İklim değişikliğine uyum kapasitesi.Her ihracatçı ülkenin iklim değişikliğine uyum kapasitesini ifade etmek için Notre Dame Üniversitesi Küresel Uyum Endeksi (ND-Kazanç Endeksi) tarafından sağlanan veri kümelerini kullandık⁶⁰Veri seti, tarım sektörüne yönelik dört göstergeye dayalı uyarlanabilir kapasite sağlar: tarım alanlarını sulama ile donatma kapasitesi, ekilebilir ve kalıcı ürün alanlarında N+P205 toplam gübre kullanımı, pestisit kullanımı ve traktör kullanımı. Ülke başına tanımlanmış uyarlanabilir kapasite puanları, temel minimumu (daha düşük puanlar) gösteren 0 ile 1 arasındadır

Tablo 2 İklimsel kırılma puanları ve karşılık gelen kırılma düzeyleri.

İklim hassasiyeti puanı (CCVS)	İklim hassasiyeti seviyesi
CCV'ler ≤ 0,5	En düşük
0,5 < CCV ≤ 1	Düşük
1 < CCV'ler ≤ 1,5	İlman
1,5 < CCV ≤ 2	Yüksek
CCV'ler > 2	Çok yüksek

daha yüksek adaptif kapasiteyi yansıtır) ve maksimum. ND-Kazanç Endeksi'nin en son yılını kullandık, 2018'e atıfta bulunduk.

Güvenlik açığı değerlendirmesi. AB ekonomisinin sınır ötesi iklim kırılma puanını hesapladık, ($V_{AB,p,e,y}$), ithal edilen bir ürünle ilgili ihracat konumundan ve yıl içinde sen, maruziyetteki değişimin bir fonksiyonu olarak ($\Delta E_{p,e,y}$), hidrolojik uç noktalara karşı duyarlılıktaki değişim ($\Delta S_{p,e,y}$) ve ihracat yerinin uyulanabilir kapasitesi (A_e):

$$V_{AB,p,e,y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{4E_{p,e,y,i} - 4S_{p,e,y,i}}{S_{p,e,y}} \quad \text{!} \quad D15\%$$

Bendiş aktarma konumunda bulunan bir izgara hücrelerini temsil eder, sahip olan N izgara hücrelerinin sayısı. $S_{p,e,y}$ Şebekenin ihracatçı ülkenin hassasiyetine olan oranını ifade eder duyarlılık. Bu oran, talep değişikliklerini ihracatçı ülkeden her ilçedeki şebeke hücrelerine dağıtmak için tanıtıldı. Talep değişikliği ülke düzeyinde hesaplanır ve kuraklık şiddeti şebeke düzeyindedir. Şebeke ölçeğinde kırılma düzeyini hesaplamak için bu oran bir dağıtım faktörü olarak kullanıldı.

Bir ürünle ilgili maruziyetteki değişiklik PAB tarafından ihracatçı bir yerden ithal edilen hedef yıl için ($\Delta E_{p,e,y}$) ithal edilen ürünün üretim yerindeki kuraklık şiddetinin oranı olarak hesaplanır. Hedef yıl arasında ve, $E_{p,e,y}$ 2010'da, $E_{p,e,y}$ 2010'da:

$$4E_{p,e,y} = \frac{E_{p,e,y}}{E_{p,e,y} 2010} \quad D16\%$$

Bir ürünle ilgili hidrolojik uç noktalara karşı duyarlılıktaki değişim PAB tarafından ihracatçı bir yerden ithal edilen hedef yıl için ($\Delta S_{p,e,y}$) AB'nin ürüne göre ithal ettiği yeşil sanal su oranı olarak hesaplanır. Parasından hedef yılın, $VW_{I, yeşil, p, y}$ m cinsinden ve 2010, $VW_{I, yeşil, p, y}$ 2010 m cinsinden:

$$4S_{p,e,y} = \frac{VW_{I, yeşil, p, y}}{VW_{I, yeşil, p, y} 2010} \quad D17\%$$

Sınır ötesi iklim kırılma puanı, yeşil sanal su ithalat hacimlerinin (m^3 olarak) ne kadar olduğunu göstermektedir. 3) ve kuraklık şiddeti birlikte, mevcut iklim özelliklerine kıyasla farklı iklim koşulları altında bir ihracat konumunda (ülke, bölge veya küresel) değişir. İhracat konumunda (örneğin bir izgara hücre, bölge, ülke veya küresel) 1'lik bir iklim kırılma puanı, hedef yılda hidrolojik uç noktalara (bu çalışmada kuraklık şiddetine) karşı gelecekteki kırılma puanının bugünkü (2010) ile aynı olduğu anlamına gelir. 1'in altındaki puanlar kuraklığa karşı azalmış bir kırılma puanı, 1'in üzerindeki puanlar ise mevcut iklim koşullarına kıyasla kuraklığa karşı artmış bir kırılma puanı gösterir.

Hedef yıllar için kuraklığa karşı hassasiyet düzeyini haritalamak amacıyla, hassasiyet için eşikler, CCVS de belirlendi (0,5 (en düşük seviye) ve CCVS > 2 (en yüksek seviye) (Tablo 2). Kırılma puanlarına göre, beş düzeyde kırılma tanımlandı: en düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek. En düşük kategori, yeşil sanal su ithalatının azalması ve/veya kuraklık şiddetinin azalması nedeniyle gelecekte kuraklığa karşı kırılma puanının önemli ölçüde azalacağı anlamına gelir. Düşük kırılma puanı, iklim kırılma puanının mevcut seviyelere yakın olduğunu ve iklim etkilerinin önemli olmadığını gösterir. Orta düzeyde kırılma puanı, iklim değişikliğinin üretim yerindeki kuraklık şiddetini olumsuz etkilediği anlamına gelir. Yüksek ve çok yüksek kırılma puanı, üretim yerlerinde kuraklık şiddetinin önemli ölçüde arttığını ve ayrıca daha büyük yeşil su sanal su ithalat hacimlerini gösterir.

Raporlama özeti. Araştırma tasarımı ilişkin daha fazla bilgi, bu makaleye bağlantısı verilen Nature Araştırma Raporlama Özeti'nde mevcuttur.

Veri kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan ve/veya analiz edilen veri kümeleri makul talep üzerine ilgili yazardan temin edilebilir.

Alındı: 30 Mart 2020; Kabul edildi: 5 Mayıs 2021;

Published online: 15 June 2021

Referanslar

- Beillouin, D., Schauburger, B., Bastos, A., Ciais, P. ve Makowski, D. 2018'de aşırı hava koşullarının Avrupa'daki mahsul üretimine etkisi. *Fil. Çeviri. R. Soc.* B375, 20190510 (2020).
- Wreford, A. ve Adger, W. Tarımda adaptasyon: Sıcak hava dalgalarının ve kuraklıkların İngiltere tarımı üzerindeki tarihi etkileri. *Uluslararası Tarım Dergisi. Sürdürülebilirlik*, 8, 278–289 (2010).
- Stah, K. ve diğerleri. Avrupa kuraklık olaylarının etkileri: metin tabanlı raporların uluslararası bir veritabanından elde edilen bilgiler. *Nat. Tehlikeleri Dünya Sistemleri Bilimi*, 16, 801–819 (2016).
- Oikonomou, PD, Karavitis, CA ve Tsesmelis, DE Son 50 Yılda Avrupa'da kuraklık özelliklerinin değerlendirilmesi. *Su Kaynakları Yönetimi*, 34, 4757–4772 (2020).
- Hari, V., Rakovec, O. ve Markonis, Y. Küresel ısınma altında 2018–2019 Orta Avrupa'daki olağanüstü kuraklığın gelecekte daha sık görülmesi. *Bilim Temsilcisi*, 10, 12207 (2020).
- Grillakis, MG İklim değişikliği nedeniyle Avrupa'da şiddetli ve aşırı toprak nemi kuraklıklarının artması. *Bilim. Toplam Çevre*, 660, 1245–1255 (2019).
- Avrupa Çevre Ajansı. Avrupa'da Tarım Sektöründe İklim Değişikliğine Uyum, ((AÇA Raporu No. 4/2019).
- Ercin, AE, Chico Zamanillo, D. ve Chapagain, A. Avrupa Birliği ekonomisinin sınırları dışındaki hidrolojik aşırı durumlara karşı kırılma puanları. *Atmosfer*, 10, 593 (2019).
- Visser, CLM, Schreuder, R. ve Stoddard, F. AB'nin hayvan yemi endüstrisi için soya fasulyesi ithalatına bağımlılığı ve AB üretimi alternatiflerin potansiyeli. *OCLE*, 1, D407 (2014).
- FAOSTAT. Mahsul Ticareti İstatistikleri, Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO), Roma, İtalya (2019). <http://www.fao.org/faostat/en/#Ev>.
- Henseler, M. ve diğerleri. GDO'lu ürünlerin eş zamanlı olmayan onayları hakkında: AB soya ithalatının ticaretinde yaşanacak aksaklıkların potansiyel pazar etkileri. *Gıda Politikası*, 41, 166–176 (2013).
- Lucas, M. ve diğerleri. Avrupa'da protein bitkisi olarak acı baklanın geleceği. *Ön. Bitki Bilimi*, 6, 705 (2015).
- Sandström, V., Lehtikainen, E. ve Peltonen-Sainio, P. Finlandiya'da bitkisel ürün ithalatının yerel üretimle değiştirilmesi: sanal su ithalatını azaltma potansiyeli. *Ön. Sürdürülebilir. Gıda Sis.*, 2, 67 (2018).
- Brás, TA, Jägermeyr, J. & Seixas, J. AB-28 gıda ithalatının ihracatçı ülkelerdeki aşırı hava felaketlerine maruz kalması. *Gıda Sek.*, 11, 1373–1393 (2019).
- ab. Rahman, AK, Abdullah, R., Nambyappan, B. ve Shariff, F. La Niña ve El Niño Olaylarının Ham Palmiye Yağı Fiyatları Üzerindeki Etkisi: Ekonometrik Bir Analiz. *Yağ palmiyesi. Ind. Economic J.*, 13, 38–51 (2013).
- Countryman, A., Paarlberg, P. ve Lee, J. Kuraklığın ABD sığır eti tedarik zinciri üzerindeki dinamik etkileri. *Tarımsal Kaynaklar Ekonomisi Rev.*, 45, 459–484 (2016).
- Baca, M., Läderach, P., Haggard, J., Schroth, G. ve Ovalle, O. Mezoamerika'da kahve yetiştiren aileler için iklim değişikliğine karşı kırılma puanı değerlendirmek ve uyum stratejileri geliştirmek için bütünsel bir çerçeve. (Bond-Lamberty B, editör). *PLoS BİR*, e88463 (2014).
- Li, Y. ve diğerleri. Çin'in tarımsal iklim değişikliğine karşı kırılma puanının bütünsel değerlendirilmesi: çok göstergeli bir yaklaşım. *İklim. Değişim*, 128, 355–366 (2015).
- Weis, SWM ve diğerleri. Duyarlılığın değerlendirilmesi: Uyarlanabilir kapasiteyi, duyarlılığı ve maruziyeti haritalamak için bütünsel bir yaklaşım. *İklim. Değişim*, 136, 615–629 (2016).
- Ahmadali, A., Moradkhani, H., Castelletti, A. ve Magliocca, N. Afrika'daki gelecekteki kuraklık riski: Duyarlılığın, iklim değişikliğinin ve nüfus artışının bütünsel değerlendirilmesi. *Bilim. Toplam Çevre*, 662, 672–686 (2019).
- Jurgilevich, A., Räsänen, A., Groundstroem, F. ve Juhola, S. İklim riski ve kırılma puanı değerlendirmelerindeki dinamiklerin sistematik bir incelemesi. *Çevre. Res. Lett.*, 12, 013002 (2017).
- IPCC. Politika yapımcılar için özet. İçinde: İklim Değişikliği: Etkiler, Uyum ve Savunmasızlık. Bölüm A: Küresel ve Sektörel Yönler. Çalışma Grubu II'nin Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin Beşinci Değerlendirme Raporuna Katkısı. (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge, 2014).
- Hunink, J. ve diğerleri. Farklı Avrupa nehir havzalarındaki tarım için su kaynakları üzerindeki iklim değişikliğinin etkisini değerlendirmek üzere basitleştirilmiş su muhasebesi prosedürü. *su*, 11, 1976 (2019).
- Öngörü. İklim değişikliğinin uluslararası boyutları. Final Proje Raporu. (Bilim Hükümeti Ofisi, Londra, 2011).
- Lewis, K. ve Witham, C. Tarımsal emtialar ve iklim değişikliği. *İklim. Pol.*, 12, S53–S61 (2012).
- PwC. İklim Değişikliğinin Birleşik Krallık İçin Uluslararası Tehditleri ve Fırsatları. (İngiltere Çevre, Gıda ve Kırsal İşler Bakanlığı, Londra, 2013).
- Hewitson, B. ve diğerleri. Bölgesel bağlam. İçinde: Barros VR, Saha CB (editörler) İklim değişikliği 2014: etkiler, uyum ve kırılma puanı: Bölüm B: Bölgesel yönler. Çalışma Grubu II'nin Beşinci Değerlendirme Raporuna Katkısı

- Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli. Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge, 2014).
28. Groundstroem, F. & Juhola, S. İklim değişikliğinin enerji sektörü üzerindeki sınır ötesi etkilerinin belirlenmesine yönelik bir çerçeve. Çevre Sist. Karar. 39, 3–15 (2013).
 29. Benzie, M. ve diğerleri. Sınır Ötesi İklim Değişikliğinin AB Üzerindeki Etkileri (AB FP7 İZLENİMLERİ Proje Çıktısı D3A.2, 2017).
 30. Benzie, M. ve diğerleri. Sınır ötesi iklim değişikliği etkileri: Avrupa Birliği için çıkarımlar. Reg. Environ. Değişim 19, 763 (2019).
 31. Avrupa Çevre Ajansı (AÇA). Avrupa'da İklim Değişikliğinin Etkileri ve Duyarlılık 2016 Gösterge Tabanlı Bir Rapor (Avrupa Çevre Ajansı: Kopenhag, Danimarka, 2017).
 32. Akciğer, T., Fussel, HM ve Eichler, L. Avrupa'nın iklim değişikliğinin Avrupa dışındaki etkilerine karşı kırılganlığı. İçinde: İklim değişikliği, etkileri ve Avrupa'da kırılganlık 2016. Avrupa Çevre Ajansı, Avrupa Birliği Yayın Ofisi, Lüksemburg, 2017).
 33. Hilden, M., Huuiki, H., Kivisaari, V. ve Kopsakangas-Savolainen, M. Bir enerji piyasasında iklim değişikliğinin ulusötesi etkilerinin önemi. Enerji Politikası 115, 418–425 (2018).
 34. Szweczyk, W., Ciscar, JC, Mongelli, I. ve Soria, AJRC PESETA III projesi: Ekonomik entegrasyon ve taşma analizi (Avrupa Birliği Yayın Ofisi, Lüksemburg, 2018).
 35. Mekonnen, M. & Hoekstra, A. Dört milyar insan ciddi su kıtlığıyla karşı karşıya. Bilim. İd. 2, 2 (2016).
 36. IASA. SSP Kamu Veritabanı Sürüm 2.0, Uluslararası Uygulamalı Sistemler Analizi Enstitüsü, Avusturya, <https://tntcat.iiasa.ac.at/SSpDb/dsd?Action=htmlsayfa&sayfa=10> (2019).
 37. Gassert, F., Reig, P., Shiao, T. ve Luck, M. Su Kemerli Küresel Haritaları 2.1 Göstergeler, Karar Almaya İlişkin Küresel Su Riski Göstergelerinin Oluşturulması. (Dünya Kaynakları Enstitüsü, Washington DC, 2015).
 38. Liu, J., Hull, V. ve Godfray, HCJ Küresel sürdürülebilir kalkınmaya yönelik bağlantı yaklaşımları. Nat. Sürdür. 1, 466–476 (2018).
 39. Fuso Nerini, F., Sovacool, B. ve Hughes, N. İklim eylemini diğer Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleriyle ilişkilendirmek. Nat. Sürdür. 2, 674–680 (2019).
 40. Brethower, DM & Dams, PC Sistem düşüncesi, sistem uygulaması. Nat. Gıda 1, 659 (2020).
 41. Turner, BL ve diğerleri. Sürdürülebilirlik biliminde kırılganlık analizi için bir çerçeve. Proc. Natl Acad. Sci. ABD 100, 8074–8079 (2003).
 42. Ercin, E. & Hoekstra, AY 2050 yılı su ayak izi senaryoları: küresel bir analiz. Çevre. Uluslararası 64, 71–82 (2014).
 43. Ercin, E. & Hoekstra, AY 2050 yılına ait Avrupa su ayak izi senaryoları. su 8, 22 (2016).
 44. Van Vuuren, DP ve diğerleri. RCP2.6: küresel ortalama sıcaklık değişimini 2 °C'nin altında tutma olasılığını araştırıyor. İklim. Değişim 109, 95–116 (2011).
 45. Van Vuuren, DP ve diğerleri. Sera gazı konsantrasyonlarının düşük seviyelerde sabitlenmesi: azaltma stratejileri ve maliyetlerinin değerlendirilmesi. Tırmanış. Chang 81, 119–159 (2007).
 46. Fujino, J., Nair, R., Kainuma, M., Masui, T. & Matsuoka, Y. 6 W/m² ışımsal zorlamada stabilize olacak bir emisyon yolu. Enerji Dergisi Özel. 3, 343–354 (2006). sayı #.
 47. Hijioka, Y., Matsuoka, Y., Nishimoto, H., Masui, T. & Kainuma, M. Sera gazı konsantrasyonu stabilizasyon hedefleri kapsamında küresel sera gazı emisyon senaryoları. J. Glob. Çevre Müh. 13, 97–108 (2008).
 48. FAOSTAT. Mahsul Ticareti İstatistikleri. (Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (Roma, 2019).
 49. İTC. PC-TAS sürüm 2005-2009 HS'de, CD-ROM (Uluslararası Ticaret Merkezi, Cenevre, 2010).
 50. İTC. PC-TAS sürümü 2009-2013 HS'de, CD-ROM (Uluslararası Ticaret Merkezi, Cenevre, 2015).
 51. Sheffield, J. & Wood, EF Küresel Eğilimler ve Toprak Nemi ve Kuraklık Özelliklerindeki Değişkenlik, 1950–2000, Karasal Hidrolojik Döngünün Gözlem Odaklı Simülasyonlarından. J. Tırmanış. 21, 432–458 (2008).
 52. Hanasaki, N. ve diğerleri. Küresel su kaynaklarının değerlendirilmesi için entegre bir model - Bölüm 1: model tanımı ve girdi meteorolojik zorlaması. Hidrolik Yer Sistemleri Bil. 12, 1007–1025 (2008).
 53. Rost, S. ve diğerleri. Tarımsal yeşil ve mavi su tüketimi ve küresel su sistemi üzerindeki etkisi. Su Kay. Ar. 44, W09405 (2008).
 54. Van Beek, LPH, Wada, Y. & Bierkens, MFP Küresel aylık su stresi: I. Su dengesi ve su bulunabilirliği. Su Kay. Ar. 47, W07517 (2011).
 55. Wada, Y., Wisser, D. ve Bierkens, MFP Yüzey suyu ve yeraltı suyu kaynaklarının çekilmesi, tahsisi ve tüketim amaçlı kullanımının küresel modellemesi. Dünya Sistem Dinamiği 5, 15–40 (2014).
 56. Müller Schmied, L. ve diğerleri. İklim zorlayıcı belirsizlik ve insan su kullanımından etkilenen küresel ve kıtasal su dengesi bileşenlerinin değişimleri. Hidrolik Yer Sistemleri Bil. 20, 2877–2898 (2016).
 57. Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J. & Piontek, F. Trendi koruyan bir önyargı düzeltmesi — ISI-MIP yaklaşımı. Dünya Sistem Dinamiği 4, 219–236 (2013).
 58. Lange, S. EWEMBI veri seti için yüzeyden aşağı doğru akan uzun dalga ve kısa dalga radyasyonunun önyargı düzeltmesi. Dünya Sistem Dinamikleri 9, 627–645 (2018).
 59. Warszawski, L. Sektörler Arası Etki Modeli Karşılaştırma Projesi (ISI-MIP): Proje çerçevesi. Proc. Natl Acad. Sci. ABD 111, 3228–3232 (2014).
 60. Chen, C. ve diğerleri. Notre Dame Üniversitesi Küresel Uyum Endeksi Ülke Endeksi Teknik Raporu. (Notre Dame Üniversitesi, Paris, Fransa, 2015).

Teşekkürler

Bu araştırma çalışması, IMPREX ve RECEIPT projeleri (hibe no. 641811 ve hibe no. 820712) kapsamında Avrupa Birliği'nin Ufuk 2020 araştırma ve inovasyon programı tarafından finanse edilmiştir.

Yazar katkıları

EE ve JH çalışmayı tasarladı. TV toprak nemi ve iklim değişikliği verilerini topladı ve kuraklık şiddetini modelledi. TV istatistiksel analizi gerçekleştirdi. EE kırılganlık analizini ve sanal su ticareti hesaplamalarını gerçekleştirdi. EE, TV ve JH makaleyi yazdı. Tüm yazarlar son sürümü onayladı.

Çıkar çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Ek Bilgiler

Ek bilgi Çevrimiçi versiyon, şu adreste bulunan ek materyalleri içerir: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23584-0>.

Yazışmalar ve malzeme talepleri EE'ye iletilmelidir

Akran değerlendirme bilgileri Doğa İletişimleri Bu çalışmanın hakem değerlendirmesine katkılarından dolayı Janina Käyhkö, Shailesh Shrestha ve diğer anonim hakemlere teşekkür ederiz. Hakem raporları mevcuttur.

Yeniden basım ve izin bilgileri şu adreste mevcuttur: <http://www.nature.com/reprints>

Yayıncının notu Springer Nature, yayınlanan haritalardaki yargı yetkisi iddiaları ve kurumsal bağlantılar konusunda tarafsızlığını korumaktadır.



Açık Erişim Bu makale Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası Lisansı kapsamında lisanslanmıştır ve bu lisans, kullanım, paylaşım ve uyarlama, dağıtım ve herhangi bir ortamda veya biçimde çoğaltma, orijinal yazar(lar) ve kaynağa uygun atıf verdiğiniz, Creative Commons lisansına bir bağlantı sağladığınız ve değişiklik yapıp yapılmadığını belirttiğiniz süreç. Bu makaledeki resimler veya diğer üçüncü taraf materyalleri, materyale ait bir atıf satırında aksi belirtilmediği sürece makalenin Creative Commons lisansına dahildir. Materyal makalenin Creative Commons lisansına dahil değilse ve amaçladığınız kullanım yasal düzenleme tarafından izin verilmeyorsa veya izin verilen kullanımı aşılıyorsa, doğrudan telif hakkı sahibinden izin almanız gerekecektir. Bu lisansın bir kopyasını görüntülemek için şu adresi ziyaret edin: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© Yazar(lar) 2021