



Article

2023년 케냐 홍수에 대한 기후학적 분석 및 미래전망

김현서, 전나연, 손락훈*

국립부경대학교 환경대기과학전공

2023 Kenyan floods: A climatological study and future perspectives

Hyeonseo Kim, Nayeon Jeon, Rackhun Son*

Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

Received: July 14, 2024 / Revised: August 19, 2024 / Accepted: August 20, 2024

*Corresponding author: +82-51-629-6642 / E-mail: rackhun@pknu.ac.kr

요약: 2023년 11월, 케냐 전역에서 일일 평균 12.5 mm/day에 이르는 기록적인 폭우가 발생했으며, 특히 키투이에서는 월간 최고 강수량이 1,178.8 mm에 달했다(KMD, 2023). 이러한 폭우로 인해 케냐에서 심각한 인명 피해와 경제적 손실이 발생하였다. 본 연구는 2023년 극한 강수의 원인을 규명하고 기후변화가 미래 극한 강수 발생 가능성에 미치는 영향을 분석하였다. 과거 극한 강수 사례와 비교하여, 2023년 인도양에서 케냐로 이동하는 수증기가 증가했으며, 인도양 쌍극자 패턴과 엘니뇨 현상으로 인한 해수면 온도의 차이가 케냐 지역 극한 강수 발생의 주요 요인임을 확인했다. 인도양 쌍극자 지수와 엘니뇨 지수를 활용하여 SSP5-8.5 하의 미래 기후 모델 시뮬레이션을 분석한 결과, 엘니뇨 패턴의 강화로 극한 강수의 빈도와 강도가 증가할 것으로 예상되며, 향후 80년 내에는 인도양 쌍극자 패턴 또한 강화되어 더욱 심각한 극한 강수가 발생할 수 있음을 보였다. 본 연구 결과는 2023년 케냐에서 발생한 극한 강수 사례가 이례적이지만 기후변화와 밀접한 연관이 있으며, 미래에도 이러한 현상이 지속될 가능성이 있음을 시사한다.

주요어: 극한 강수, 인도양 쌍극자, 엘니뇨, 기후 변화

ABSTRACT: In November 2023, Kenya experienced record-breaking rainfall with a daily average of 12.5 mm/day, particularly in Kitui, where the monthly maximum rainfall reached 1,178.8 mm (KMD, 2023). This extreme rainfall led to severe human and economic losses across the country. This study investigates the causes of 2023 extreme rainfall and analyzes the impact of climate change on the future occurrence of extreme rainfall events. Compared to past extreme rainfall cases, it was found that the amount of water vapor moving from the Indian Ocean to Kenya increased in 2023, and that the difference in sea surface temperatures caused by the Indian Ocean Dipole and El Niño was a major factor contributing to extreme rainfall in Kenya. Using the Indian Ocean Dipole and El Niño indices, analysis of future climate model simulations under SSP5-8.5 shows that the frequency and intensity of extreme rainfall is projected to increase due to the strengthening of the El Niño. Additionally, the Indian Ocean Dipole is expected to intensify over the next 80 years, potentially leading to more severe extreme rainfall events. This study suggests that while the extreme rainfall event in Kenya in 2023 was unusual, it is closely related to climate change and such events are likely to continue in the future.

Key words: extreme rainfall, Indian Ocean Dipole, El Niño, climate change

1. 서론

2023년 11월, 케냐를 포함한 동아프리카 지역에서 약 300-600 mm의 강수로 인해, 최소 60명이 사망, 13만 명 이상의 이재민이 발생했으며, 가축 폐사와 주요 기반 시설 피해 등 막대한 경제적 손실이 발생했다(WWA, 2023; OCHA, 2023). 케냐의 소우기 기간인 10-12월 석 달의 평균 강수량이 약 83 mm인 것을 고려한다면, 2023년 11월 강수량은 매우 이례적인 극한 강수 현상이었다(Climate Change Knowledge Portal). 이러한 이례적인 극한 강수 현상은 기후 변화와 밀접한 관련이 있다. IPCC 6차 제1실무그룹 보고서에 따르면 지구온난화로 인해 전 세계적으로 집중호우 및 홍수 피해의 빈도와 강도는 산업화 이전(1850-1900년)과 비교하여 증가하고 있으며, 앞으로 온도 1°C 상승 시 극한 강수 발생은 전 세계적으로 약 7% 증가할 것으로 전망했다(IPCC, 2021).

2023년의 경우 다른 과거의 사례들과 달리, 10-12월 기간 내에 많은 양의 강수량이 11월 한 달 동안 집중되었다(그림 1a). 11월 강수량(12.47 mm/day)은 과거 45년 동안 월별 강수량으로는 가장 높은 수치를 기록했으며, 이는 두 번째로 높은 기록보다 약 1.5배 높다는 점을 고려한다면 매우 이례적인 경우이며 기후변화로 인한 전 지구적 극한 강수 증가 추세와 연관 있을 것으로 추측된다.

케냐에서 폭우로 인한 홍수 사례는 과거 1997년, 2019년에도 발생했으며, 주요 원인으로 인도양 쌍극자(Indian Ocean Dipole, IOD) 현상이 지목되었다(MacLeod *et al.*, 2024). IOD는 인도양의 동서 해수면 온도 차이를 나타내는 대기

해양 현상으로, 양의 IOD 상태, 즉 동인도양의 해수면 온도가 평년보다 낮고 서인도양의 해수면 온도가 높은 상태일 때 동아프리카 지역의 강수량을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Hashizume *et al.*, 2009). 평년에는 적도 중앙 인도양에서 서풍으로 인해 동아프리카 지역으로의 수증기 공급이 적다. 그러나, 양의 IOD 상태에서는 중앙 인도양에서 낮은 고도의 강한 동풍 편차가 존재하여 서풍이 약화되고, 이에 따라 동아프리카로 들어오는 수증기로 인해 강수량이 증가한다(Wainwright *et al.*, 2021). 기후 변화로 인해 양의 IOD 현상이 빈번해질 가능성이 있다는 이전 연구를 통해, 2023년 소우기의 극한 강수 현상이 기후 변화의 영향을 받은 것으로 보여진다(Palmer *et al.*, 2023).

기후변화가 동아프리카의 강수에 미칠 수 있는 영향에 대한 연구는 다양한 방향으로 진행되어 왔다. Ayugi *et al.* (2021)는 기후 변화로 인해 케냐 소우기 기간의 총 강수량과 연속으로 비가 내릴 날이 증가할 가능성이 있음을 분석하였다. 또한, Palmer *et al.* (2023)는 동아프리카 소우기 기간이 대우기(3-5월) 기간보다 더 많은 강수가 발생할 것이라고 예상했으며, 소우기 기간의 강수 증가 원인으로 지구 온난화로 인한 서인도양 해수면 온도 상승을 꼽았다.

본 연구에서는 2023년 케냐에 발생한 극한 강수 사례의 기후학적 원인을 이해하기 위하여 대기 및 해양 조건의 특징을 분석하고 IOD와 엘니뇨와의 관계에 대해 조사하였다. 추가적으로 기후변화 시나리오에 따른 기후학적 특징들의 변화를 토대로 2023년과 유사한 극한 강수 사례의 추이에 대해 분석하였다.

2. 방법 및 자료

2.1. 연구 지역

케냐는 동아프리카의 적도 부근 위도 5°N-5°S, 경도 34-42°E에 위치하고 있으며, 약 582,646 km²의 면적을 차지한다. 케냐의 연평균 강수량은 680 mm이며, 케냐 북부에서는 250 mm 미만, 케냐 서부에서는 2,000 mm 이상까지 변동한다(Macharia *et al.*, 2020). 케냐에는 두 번의 주요 우기가 존재하며, 첫 번째 우기는 3월부터 5월까지의 대우기, 두 번째 우기는 10월부터 12월까지의 소우기이다(Yang *et al.*, 2015). 이 두 번의 우기는 적도를 가로질러 남북으로 움직이는 적도 수렴대(Inter-Tropical Convergence Zone, ITCZ)에 의해 발생하며, 대우기에는 ITCZ가 느리게 움직여 몇 주 동안 비가 내리는 반면, 소우기에는 ITCZ가 빠르게 남쪽으로 이동하여 폭우가 상대적으로 짧은 기간 동안 지속된다(Black *et al.*, 2003). 전 세계적인 해수면 온도의 변화가 케냐의 강수에 큰 영향을 미치며, 특히 태평양과 인도양의 해수면 온도 변동이 엘니뇨와 IOD 현상을 유발하여 강수 패턴에 영향

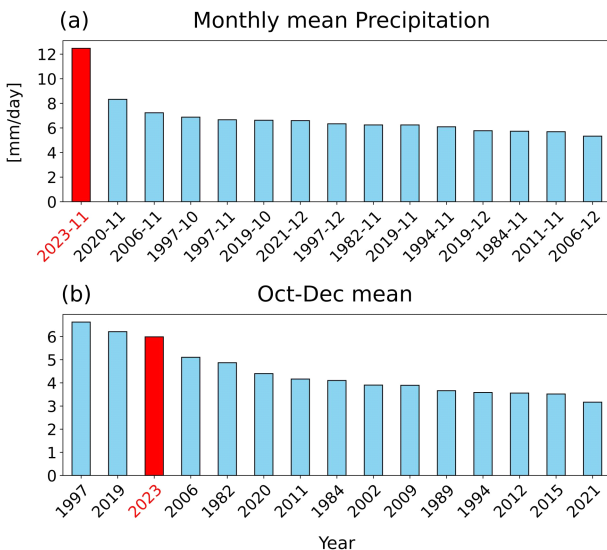


Fig. 1. In Kenya from 1979 to 2023, Top 15 of (a) monthly precipitation during the short rains (October-December), (b) average precipitation from October to December annually.

을 준다(Black *et al.*, 2003; Owiti *et al.*, 2008).

2.2. 재분석 기후 자료

강수량 분석을 위해 미국 국립 해양 대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (CMAP) 강수량 자료를 이용하였다(Xie and Arkin, 1997). CMAP 강수량 자료는 1979년부터 현재까지 2.5°×2.5°의 공간 해상도로 전 지구의 월평균 강수량을 제공한다. 본 연구에서는 1979년부터 2023년까지의 자료를 사용하여 강수량을 분석하였다.

Integrated water vapor transport (IVT) 와 Integrated water vapor (IWV) 계산을 위한 수평 바람, 비습 자료는 미국 국립 해양 대기청에서 제공하는 NCEP-NCAR Reanalysis 1 자료를 이용하였다(Kalnay *et al.*, 1996). Reanalysis 1 자료는 2.5°×2.5°의 수평 해상도, 연직으로는 1,000 hPa부터 10 hPa까지의 3차원 전 지구 기후 자료를 제공한다.

해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST)는 미국 국립 해양 대기청에서 제공하는 Centennial In Situ Observation-based Estimates of the Variability of SSTs and Marine Meteorological Variables Version 2 (COBE-SST 2) 자료를 이용하였다. COBE-SST 2는 월평균 SST를 1850년부터 현재까지 1.0°×1.0°의 공간 해상도로 제공하고 있으며(Hirahara *et al.*, 2014), 본 연구에서는 다른 자료와 분석 기간을 일치시키기 위해 1979년부터 2023년까지의 자료를 사용하였다.

2.3. 재현 기간(Return Period)

2023년 11월에 발생한 강수 현상이 얼마나 극단적인지 수치적으로 확인하기 위해 재현 기간(Return Period)을 계산하였다. 재현 기간이란 주어진 현상이 최소 한 번 이상 동일하거나 초과할 때까지 평균적으로 걸리는 시간을 의미하며, 본 연구에서는 Generalized Extreme Value (GEV) 분포를 통해 재현 기간을 계산하였다. GEV 분포는 Gumbel, Fréchet, Weibull 분포를 결합한 형태로, 주어진 데이터에서 극단적인 값을 추정하기 위해 주로 사용되는 통계적 분포이며, GEV 분포의 누적 분포 함수를 통해 재현 기간을 다음과 같이 정의한다(Namitha and Ravikumar, 2018).

$$\text{Return Period} = \frac{1}{1 - F(x)} \quad (1)$$

x 는 분석하고자 하는 데이터, $F(x)$ 는 GEV 분포의 누적 분포 함수이다.

$$F(x) = \exp \left\{ - \left(1 - \frac{\kappa(x - \xi)}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right\} \quad (2)$$

GEV 분포의 누적 분포 함수는 κ 는 형태(shape), ξ 는 위치(location), α 는 척도(scale) 매개변수에 의해 분포가 결정된다. 형태 매개변수는 분포의 모양을 결정하고, 이에 따라 GEV 분포가 Gumbel, Fréchet, Weibull 분포 중 하나의 분포를 따르게 된다. 위치 매개변수는 분포의 중심 위치를, 척도 매개변수는 분포의 폭을 결정한다(Namitha and Ravikumar, 2018). 본 연구에서는 세 매개변수를 자동으로 추정하여 GEV 분포를 통한 재현 기간을 계산하였다(Namitha and Ravikumar, 2018).

2.4. Integrated water vapor transport (IVT), Integrated water vapor (IWV)

강수 현상의 특징을 조사하기 위해, 수평으로 이동하는 수증기 수송의 연직 합을 나타내는 IVT와 연직으로 존재하는 총 수증기의 양을 나타내는 IWV를 분석하였다. IVT는 동서 바람과 남북 바람으로 운반되는 수증기의 양을 연직으로 합산하여, 바람에 의해 수평으로 운반되는 총 수증기의 수송량과 수송 방향을 표현한다. 이는 수증기 함량과 풍속을 결합한 정보로, 특정 지역으로 운반된 수증기의 양과 방향을 분석하는 데 활용된다(Gimeno-Sotelo and Gimeno, 2023). IWV는 연직으로 대기에 포함된 총 수증기의 양을 의미한다. 절대적인 수분 함량을 나타내는 지표로, 잠재적으로 강수가 발생할 수 있는 대기 중의 수분을 나타낸다. 높은 IWV 값은 대기 중 수분이 많음을 의미하며, 이때 공기가 수렴하는 경우 많은 강수량을 발생시킬 가능성이 있다(Hocke *et al.*, 2021).

IVT와 IWV는 대기의 수증기량과 관련된 중요 인자들로, 대기의 강(Atmospheric river, AR) 분석에서 주로 사용된다. 대기의 강은 좁고 길게 늘어진 수증기 흐름으로, 다량의 수증기를 운반하여 강수를 유발하기 때문에, IVT와 IWV는 극한 호우 분석에 중요한 정보를 제공한다(Lavers *et al.*, 2013; Lavers and Villarini, 2013). 예를 들어 인도 여름 몬순 기간 동안, 기후 변화로 인해 해수면 온도가 상승함에 따라 IVT가 증가하여 인도 지역의 강수량과 홍수 빈도가 높아지는 것으로 나타났다(Mahto *et al.*, 2023). 캘리포니아에서의 강수량 빈도와 강도는 알류산 저기압의 확장으로 인해 캘리포니아로 향하는 IVT가 강화된 것과 연관이 있는 것으로 알려졌다(Polade *et al.*, 2017). 이러한 사례들은 극한 호우와 IVT의 관계를 보여주며, 본 연구에서도 IVT와 IWV를 활용하여 케냐 폭우 사례를 분석하였다.

IVT와 IWV는 다음 수식을 통해 계산된다(Kwon *et al.*, 2022).

$$IVT = |IVT|,$$

$$IVT = \left(-\frac{1}{g} \int_{1000hPa}^{300hPa} q u dp \right) \vec{x} + \left(-\frac{1}{g} \int_{1000hPa}^{300hPa} q v dp \right) \vec{y} \quad (3)$$

$$IWV = -\frac{1}{g} \int_{1000hPa}^{300hPa} q dp \quad (4)$$

여기서 \vec{x} , \vec{y} 는 동서, 남북 방향의 단위 벡터, u , v 는 동서, 남북 방향의 바람, q 는 비습, g 는 중력 가속도이다(Kwon *et al.*, 2022). 본 연구에서 연직 적분은 대류권에 해당하는 1,000 hPa에서 300 hPa까지를 고려하였다.

2.5. Dipole Mode Index, Niño3.4 Index

케냐의 극한 강수와 관련 깊은 인도양 쌍극자, 엘니뇨와 강수량의 관계를 분석하기 위해 인도양 쌍극자 지수(Dipole Mode Index, DMI)와 엘니뇨 지수(Niño3.4 지수)를 사용했다. DMI는 서인도양(50°-70°E, 10°N-10°S)과 동인도양(90°-110°E, 0-10°S)의 해수면 온도 편차 차이를 3개월 이동 평균하여 계산한 지수이다(Hashizume *et al.*, 2009). Niño3.4 지수는 Niño3.4 지역(170-120°W, 5°N-5°S)의 해수면 온도 편차를 5개월 이동 평균하여 계산한 지수이다(Climate Data Guide, 2024). 해수면 온도 자료는 COBE-SST 2를 사용했으며, 본 연구에서는 DMI>0.5인 경우를 강한 양의 IOD로, Niño3.4>1.5인 경우를 강한 엘니뇨라고 정의한다.

2.6. CMIP6 미래 기후 자료

CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project phase 6)은 과거, 현재 및 미래 기후에 대한 연구를 위한 국제 협력 프로젝트로, 다양한 기후 모델 간의 비교와 평가를 통해 전 세계 기후 예측 데이터를 제공한다(Eyring *et al.*, 2016). 지구온난화로 인한 극한 강수 발생 추이 분석을 진행하기 위해 매우 높은 수준의 온실가스 배출 시나리오인 SSP5-8.5 (IPCC, 2021)에 따른 총 27개(HadGEM3-GC31-MM, FGOALS-g3, NorESM2-MM, NorESM2-LM, EC-Earth3-CC, CIESM, CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3-Veg-LR, MCM-UA-1-0, UKESM1-0-LL, CNRM-CM6-1, NESM3, MPI-ESM1-2-LR, HadGEM3-GC31-LL, CMCC-CM2-SR5, CNRM-ESM2-1, MIROC-ES2L, MIROC6, CESM2, FIO-ESM-2-0, IITM-ESM, KIOST-ESM, FGOALS-f3-L, CanESM5-CanOE, CMCC-ESM2, CAMS-CSM1-0, ACCESS-CM2)의 해수면 온도 모델 시뮬레이션 데이터를 사용하였다(Copernicus Climate Change Service; Climate Data Store, 2021). 2015년부터 2100년까지의 월별 자료를 사용하였고, 각 모델 간의 공간 해상도를 일치시키기 위해 COBE-SST2 자료와 동일한 해상도로 보간 처리하여 분석하였다.

Table 1. Return Period (RP, years) of the Top 10 precipitation (mm/day) during the short rains (October-December) from 1979 to 2023.

Period	Precipitation	RP
2023-11	12.47	501.41
2020-11	8.33	60.71
2006-11	7.23	32.52
1997-10	6.88	26.42
1997-11	6.67	23.32
2019-10	6.63	22.76
2021-12	6.59	22.35
1997-12	6.33	19.12
1982-11	6.24	18.10
2019-11	6.24	18.09

3. 연구결과 및 토의

3.1. 소우기 강수량 분석

그림 1은 지난 45년(1979-2023년) 동안 케냐의 소우기(10-12월) 강수량 기록을 분석한 결과를 보여준다. 각 월의 강수량을 비교한 결과(그림 1a), 2023년 11월의 강수량은 12.47 mm/day로 지난 45년 중 가장 높은 수치를 기록했으며, 그다음으로 2020년 11월(8.33 mm/day), 2006년 11월(7.23 mm/day)이 높은 강수량을 보였다. 각 달의 강수량에 대한 재현 기간(Return Period)을 분석한 결과, 2023년 11월의 경우 약 500년에 한 번 나타날 정도의 극단적인 경우인 것으로 나타났다. 2020년 11월(61년) 및 2006년 11월(33년)과 비교했을 때 매우 높은 수치로, 2023년 11월의 강수량이 매우 이례적인 경우였음을 보여준다(표 1).

연도별 소우기 평균 강수량을 비교한 결과(그림 1b), 2023년은 5.98 mm/day로 세 번째로 비가 많이 온 해로 나타났다. 가장 높은 강수량 수치는 1997년 6.62 mm/day로 기록되었으며, 이는 양의 인도양 쌍극자(IOD)로 인한 발생한 극단적인 강수 현상 사례로 알려져 있다(OCHA, 2019). 2019년 또한 6.21 mm/day로 2023년보다 높은 강수량을 보였으며, 그다음으로 2006년이 5.11 mm/day의 강수량을 기록했다.

그림 1a의 소우기 월별 강수량을 살펴보면, 연도별 강수량에서 상위권을 차지한 1997, 2006, 2019년은 10월-12월 기간 중 두 달 이상이 높은 강수량을 기록하며 고르게 강수가 발생했다. 반면, 2023년의 경우 소우기 기간 중 11월에만 많은 강수량을 기록했다. 따라서 2023년 소우기의 극한 강수는 일반적으로 석 달에 걸쳐 내려야 할 강수가 11월에 집중되어 내린 이례적인 강수 현상이라고 볼 수 있다.

3.2. 기후 패턴 분석

극한 강수 현상이 발생했을 때 강수 및 수증기 패턴을 분석하기 위해, 2023년과 소우기 평균 강수량이 높았던 1997

년, 2006년, 2019년(그림 1a)에 대해 강수량, IVT 및 IWV의 편차(anomaly)를 분석하였다. 분석 지역은 케냐를 포함한 동아프리카 지역에 영향을 주는 서인도양-서태평양(30-140°E, 25°N-25°S)으로 설정하였다. 강수량의 경우, 모든 해에서 대부분 케냐를 포함한 서인도양(45-60°E, 10°N-10°S)에서 평년 대비 높은 강수량이, 동인도양(65-100°E, 0-20°S)에서 낮은 강수량이 공통적으로 나타났다(그림 2). 다만, 인도차이나반도와 인도네시아 지역에서는 연도별로 차이점이 발견되었다. 2023년 10월은 인도차이나반도에서 평년 대비 강수량이 많았고 인도네시아 지역에서 강수량이 적은 패턴을 보인 반면(그림 2a), 2019년의 경우는 이와 반대로 나타났다(그림 2b). 2023년 11월은 말레이시아 동쪽 해안에서 평년 대비 높은 강수량을 보였지만(그림 2e), 다른 해들은 모두 낮은 강수량이 나타났다(그림 2f, 2g, 2h). 2023년 12월은 필리핀 동쪽 해안에서 평년 대비 적은 강수량과 베트남과 말레이시아 사이 해안에서 부분적으로 평년 대비 많은 강수량을 보였지만(그림 2i), 2019년과 1997년은 베트남과 말레이시아 사이 해안에서 평년 대비 낮은 강수량을 보였다(그림 2j, 2l).

2023년 인도양 지역(55-95°E, 10°N-20°S)의 IVT 패턴을 분석한 결과, 위도 0-10°S와 5-10°S에서 평년의 흐름과 동일한 방향으로의 이동이 강하게 발생한 것을 확인할 수 있다. 이 흐름은 남인도양 지역에서 케냐 지역으로 수송되는 수증기 흐름이 평년에 비해 2023년에 강했음을 나타낸다(그림 3a, 3e, 3i). 다른 해들도 유사한 패턴을 보이지만, 2019년, 2006년 12월은 위도 5-10°N, 5-15°S에서(그림 3j,

3k), 1997년 11월, 12월은 위도 10°N-10°S에 나타나 발생 위치에서 차이를 보였다(그림 3h, 3l).

2023년 인도양 지역(55-95°E, 10°N-20°S)에서는 평년과 반대 방향의 IVT 편차가 위도 10°N-0, 10-20°S에서 나타났다(그림 3a, 3e, 3i). 평년에는 동아프리카 지역에서 인도양 방향으로 수증기가 이동하지만, 2023년에는 인도양으로 빠져나가는 수증기 흐름이 약해졌다고 해석할 수 있다. 이러한 패턴은 2019년 10월, 11월과 1997년 10월에서도 유사하게 나타났으나, 위치와 강도에서 차이를 보인다(그림 3b, 3f, 3d).

IWV를 분석한 결과, 2023년과 다른 연도 모두 공통적으로 케냐를 포함한 서인도양(45-60°E, 10°N-10°S)에서 평년 대비 많은 양의 수증기가, 동인도양(65-100°E, 0-20°S)에서는 적은 양이 관찰되었다(그림 4). 그러나 2023년 서태평양(100-140°E, 25°N-0°) 지역에서는 대부분 평년 대비 수증기량이 많았지만, 다른 해에서는 평년 대비 낮은 수증기량을 보였다(그림 4).

강수 및 수증기 패턴 분석을 통해, 동아프리카로 유입되는 IVT가 강화되면서 서인도양 지역의 IWV는 증가, 동인도양 지역은 감소하는 것으로 나타나며, 이러한 패턴이 강해져 케냐 지역의 강수량이 증가한 것으로 분석된다.

3.3. IOD와 엘니뇨의 영향

과거 극한 강수 사례에서 나타난 IOD와 엘니뇨 현상의 패턴을 2023년과 비교하기 위해 서인도양부터 동태평양(30°E-70°W, 25°N-25°S)까지의 해수면 온도 편차를 통해

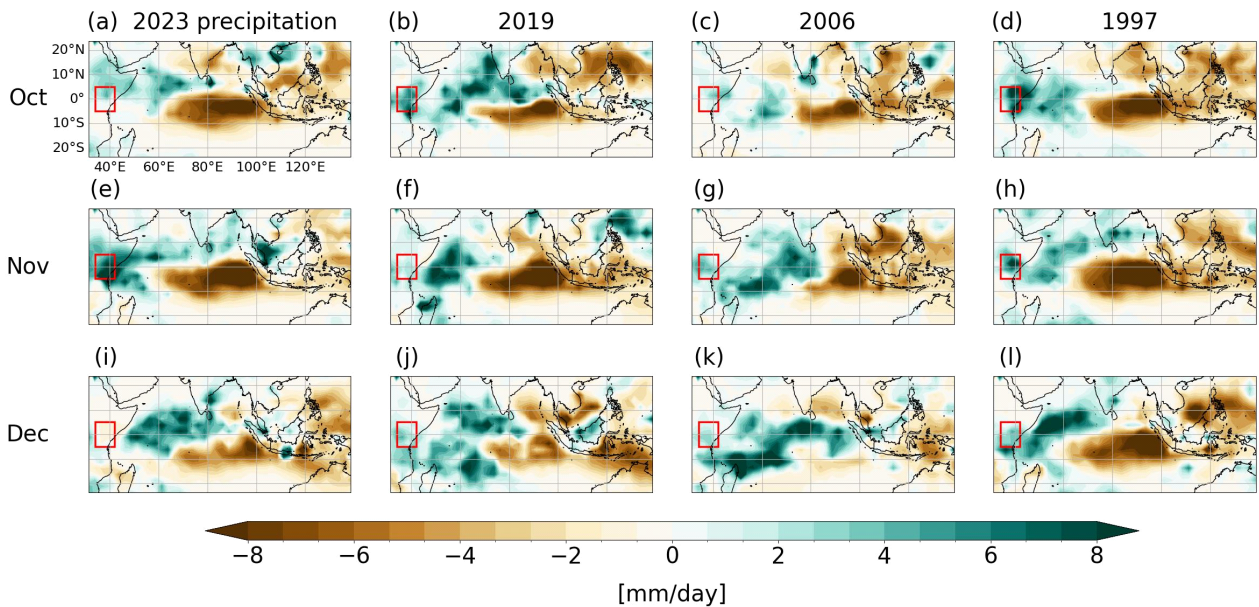


Fig. 2. Precipitation anomalies during the short rains (October-December): a. 2023, b. 2019, c. 2006, d. 1997. The study area, including Kenya, is indicated by the red box.

IOD 및 엘니뇨와 극한 강수와의 관계를 분석하였다(그림 5). 인도양에서는 강수가 많이 온 해 모두 서인도양(45-60°E)에서 평년 대비 해수면 온도가 높고 동인도양(65-100°E)은 온도가 낮은 양의 IOD 패턴이 나타났다. 1997, 2019, 2023년의 경우는 다른 해에 비해 동-서인도양의 온도 차이가 더 뚜렷하게 나타나 가장 강한 양의 IOD 패턴을 보인 반면(그

림 5a, 5b, 5d), 2006년은 상대적으로 약한 양의 IOD 패턴을 보였다(그림 5c).

2023년 태평양에서는 강한 엘니뇨 패턴이 나타나는데, 동태평양(90-150°W)의 해수면 온도가 평년 대비 높고 서태평양(120-180°E)은 낮으며 그 차이가 매우 뚜렷하다. 2023년과 비슷한 IVT 및 IWV 패턴을 보인 1997년에도 강

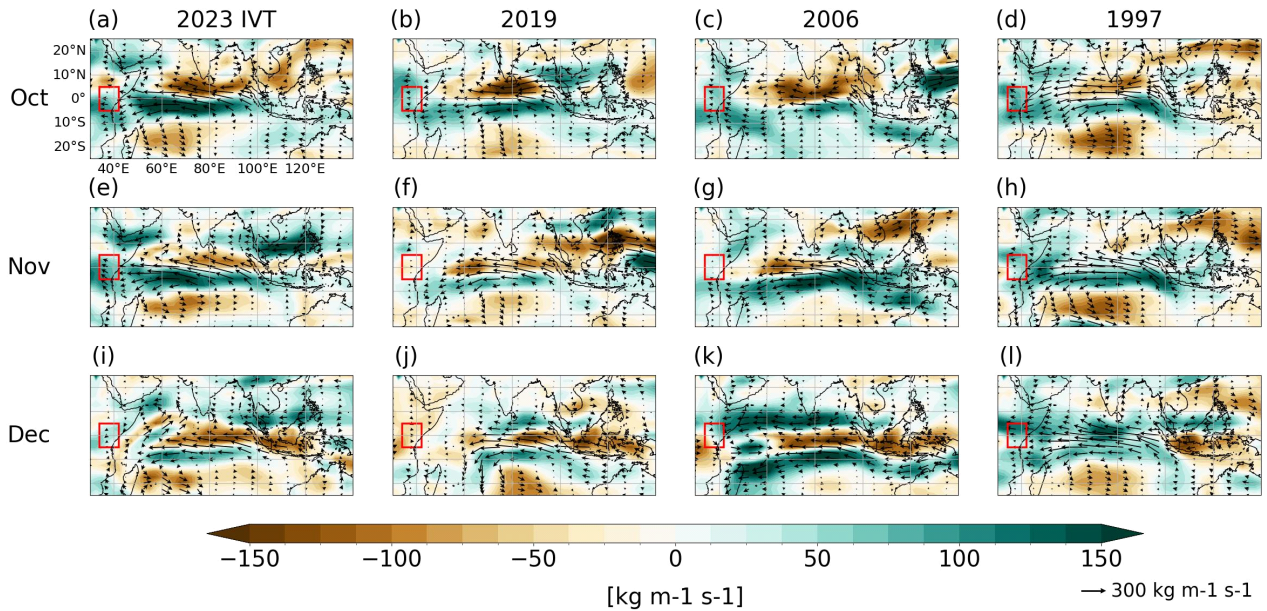


Fig. 3. IVT anomalies during the short rains (October-December): a. 2023, b. 2019, c. 2006, d. 1997. The study area, including Kenya, is indicated by the red box. Colors represent the anomalies in water vapor transport, and vectors indicate the direction of the anomalies.

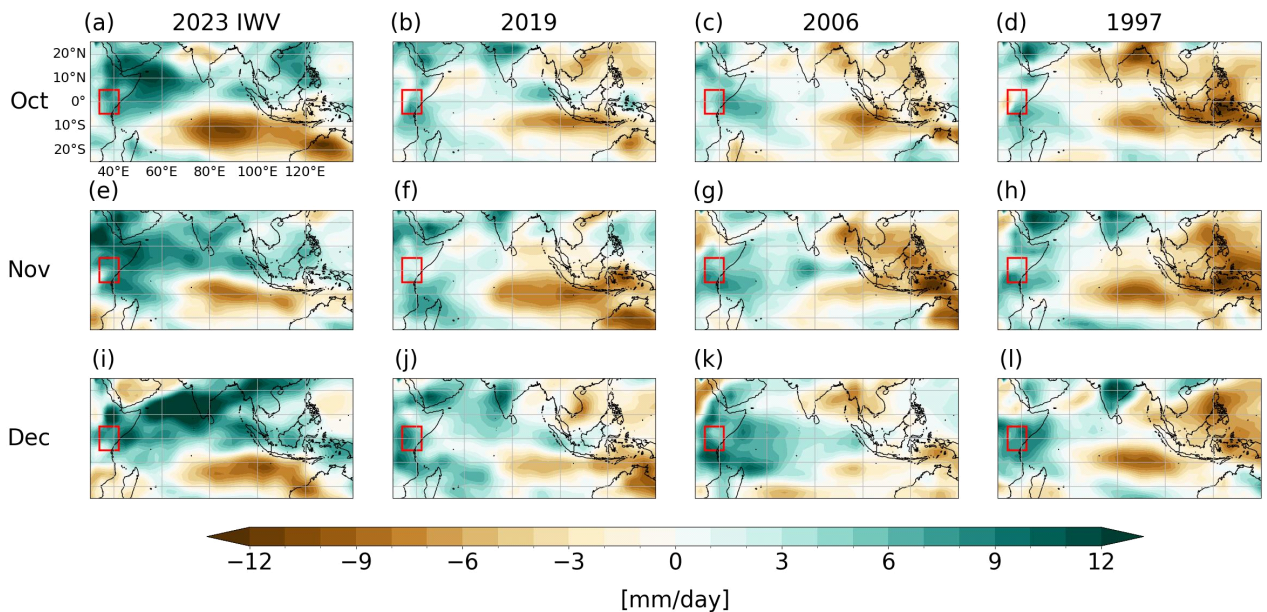


Fig. 4. IWV anomalies during the short rains (October-December): a. 2023, b. 2019, c. 2006, d. 1997. The study area, including Kenya, is indicated by the red box.

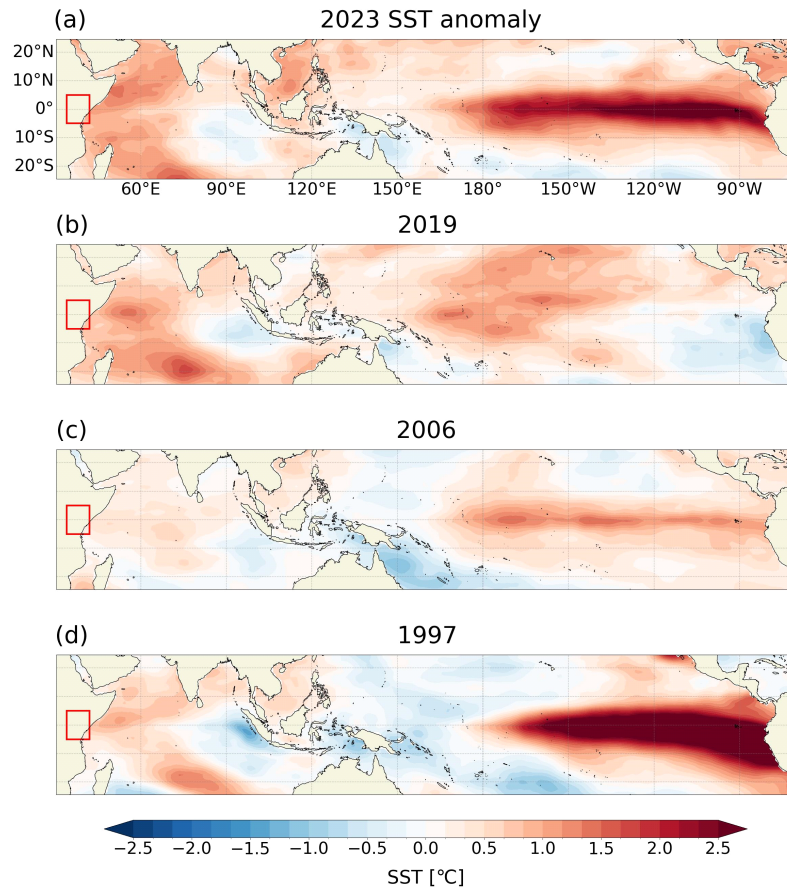


Fig. 5. Sea surface temperature anomalies during the short rains (October-December): a. 2023, b. 2019, c. 2006, d. 1997.

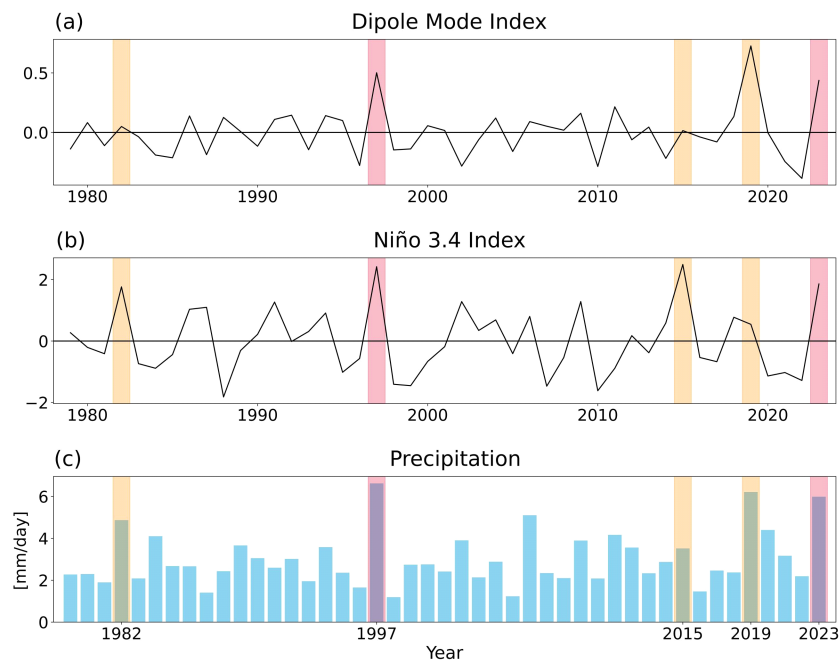


Fig. 6. October-December averages from 1979 to 2023: a. Indian Ocean Dipole Mode Index (DMI), b. Niño3.4 Index, c. average precipitation in Kenya. The red shading indicates years when both $DMI > 0.5$ and $Ni\tilde{n}o3.4 > 1.5$ conditions are met, and the orange shading indicates years when either $DMI > 0.5$ or $Ni\tilde{n}o3.4 > 1.5$ conditions are met.

한 엘니뇨가 관찰되며 동-서태평양의 온도 경도가 매우 크게 나타난다(그림 5d). 2019년의 경우 엘니뇨 패턴은 관찰되지 않았으며(그림 5b), 2006년은 엘니뇨 패턴이 나타나지만 2023년과 1997년에 비해 상대적으로 약한 상태를 보였다(그림 5c). 따라서, 2023년 케냐의 극한 강수 현상은 1997년과 유사하게 양의 IOD와 강한 엘니뇨의 복합적인 효과로 인한 현상임을 짐작할 수 있다.

그림 6은 지난 45년간 10-12월 평균 DMI 및 Niño3.4 지수와 케냐 지역의 강수량을 비교하고 있다. DMI가 0.5 초과로, 강한 양의 IOD가 관찰되었던 1997년, 2019년 그리고 2023년에 강수량이 높게 나타나는 공통적인 특징을 보였다(그림 6a, 6c). Niño3.4 지수가 1.5를 초과하여 상대적으로 강한 엘니뇨 패턴이 발생했던 1982년과 2015년에도 강수량이 높게 나타났지만(그림 6b, 6c). 그러나 앞서 언급된 연도들에 비해 상대적으로 낮은 강수량을 기록한 것을 고려할 때, 케냐의 극한 강수 현상은 엘니뇨보다 양의 IOD 현상에 더 직접적인 영향을 받은 것으로 판단된다.

2023년은 1997년과 같이 $DMI > 0.5$ 와 $Ni\tilde{no}3.4 > 1.5$ 의 조건을 동시에 충족하는 해로서, 소우기 평균 강수량이 평년(83 mm)에 비해 많았다(Climatic Change Knowledge Portal). 이 두 조건 중 하나만 만족하는 경우, 2019년을 제외하고 조건을 동시에 만족하는 경우보다 평균 강수량이 낮았다(그림 6c). 이는 양의 IOD와 강한 엘니뇨가 동시에 발생했을 때 극한 강수 발생 가능성이 더 높음을 시사한다.

3.4. 기후변화에 따른 극한 강수 추이 분석

기후변화에 따른 케냐 지역의 극한 강수 발생의 빈도와 강도에 미치는 영향을 알아보기 위해, SSP5-8.5 시나리오에 따라 양의 IOD와 엘니뇨가 강하게 동시에 발생하는 조건($DMI > 0.5$, $Ni\tilde{no}3.4 > 1.5$)의 변화를 분석하였다. 2015년부터 2100년까지 10년 간격으로 분석한 결과, 양의 IOD와 엘니뇨가 강하게 발생하는 빈도는 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며(그림 7a), 이는 지구온난화로 인해 케냐에서 극한 강수가 더 자주 발생할 수 있음을 의미한다.

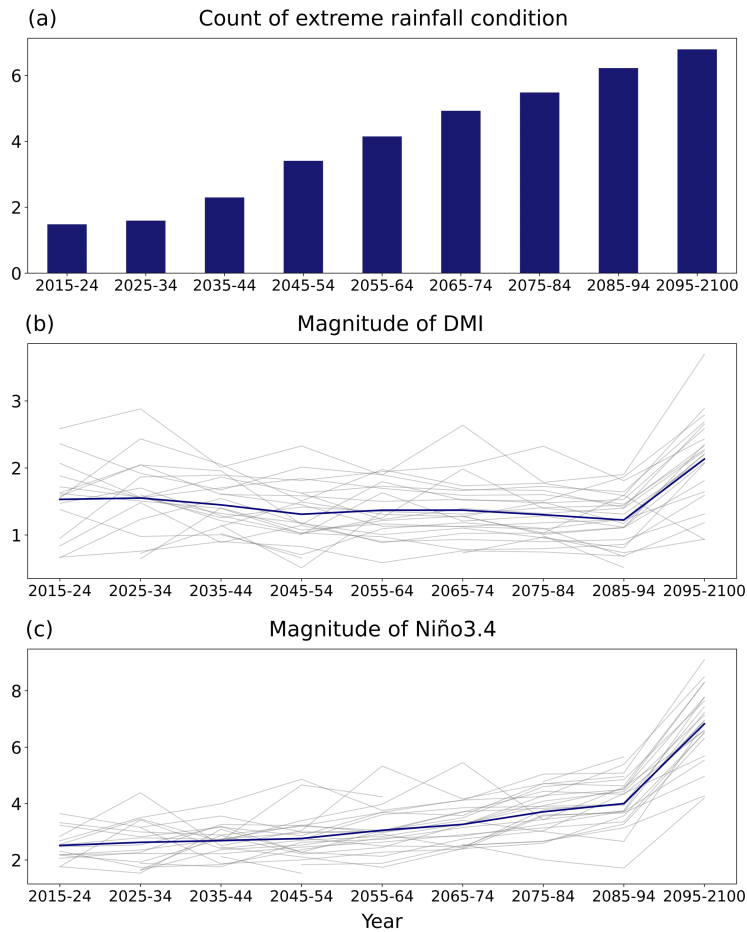


Fig. 7. The SSP5-8.5 climate change scenario: a. Frequency of concurrent conditions satisfying $DMI > 0.5$ and $Ni\tilde{no}3.4 > 1.5$, and decadal trends of the average values of b. DMI and c. Niño3.4 index under these conditions (gray solid lines represent the results from individual models).

강한 양의 IOD와 엘니노 조건을 만족할 때(DMI>0.5, Niño3.4>1.5)의 DMI와 Niño3.4 지수의 평균값을 10년 간격으로 비교했다(그림 7b, 7c). DMI의 강도는 시간에 따른 증가 추세가 뚜렷하게 나타나지 않지만, 2095년 이후 급격히 증가하는 패턴을 보였다. Niño3.4 지수는 평균값이 증가하는 추세가 뚜렷하게 나타났으며 2095년 이후로는 증가 추세가 더 가파르게 나타났다. 이는 지구온난화로 인한 엘니노 현상의 강화로 인해 케냐 지역 극한 강수의 강도가 높아질 수 있는 가능성을 제시하고 있으며, 2095년 이후로는 IOD와 엘니노의 강화가 동시에 이루어지면서 극한 강수 현상이 매우 심각해질 수 있음을 시사한다.

4. 결론

지난 45년간(1979~2023년) 케냐의 소우기 기간 동안 월별 강수량을 비교한 결과, 2023년 11월은 일일 평균 12.47 mm로 역대 최고치를 기록했으며, 501년 만에 한 번 발생할 수 있는 극단적인 강수 현상으로 나타났다. 또한, 연도별 소우기 평균 강수량을 비교했을 때 2023년은 세 번째로 비가 많이 온 해로 2023년 소우기에 발생한 강수가 특히 11월에 집중된 극한 강수 현상으로 나타났다.

2023년 소우기의 극한 강수 현상은 수증기가 인도양에서 케냐 방향으로 흐름이 강화된 것에 영향을 받았으며, 강한 양의 IOD 현상과 엘니노가 동시에 발생한 것이 이러한 기후 패턴을 강화해 동아프리카 지역의 강수에 영향을 준 것으로 보인다. DMI와 Niño3.4 지수를 분석한 결과, 양의 IOD가 엘니노보다 극한 강수에 더 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었으며, 두 현상이 동시에 발생했을 경우 극한 강수의 강도가 더욱 커진다는 사실을 알 수 있었다. 이와 같이 기후 현상의 강도를 정량적으로 파악함으로써, 추후 일어날 극한 현상의 위험을 평가하는 데 기여할 수 있을 것이다.

SSP5-8.5 시나리오에 따른 미래 기후 분석 결과, 양의 IOD와 엘니노가 동시에 강하게 발생하는 경우가 증가하면서, 극한 강수의 빈도가 증가할 것으로 예측된다. 특히 2080년 이후로는 양의 IOD 패턴의 강화가 더욱 명확하게 나타나, 강수 현상의 강도 역시 급격히 증가할 것으로 전망된다.

2023년 소우기에는 11월에 강수가 집중되는 이례적인 현상이 발생했으나, 본 연구에서는 이러한 단기간에 집중된 극한 강수 현상을 충분히 다루지 못했다. 단기간에 집중적으로 오는 강수는 피해를 더욱 심화시킬 수 있으므로, 이러한 현상의 미래 추이에 대한 연구가 필요하다. 또한, 강수 강도를 분석하면서 극한 강수에 영향을 미치는 강한 IOD 현상과 엘니노에 중점을 두었지만, Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ)과 Madden-Julian Oscillation (MJO) 등 다양

한 대기와 해양의 상호작용이 강수에 주는 영향이 존재하므로, 이에 대한 추가 분석이 필요해 보인다.

기후 변화로 인해 극한 강수의 강도와 빈도가 증가함에 따라, 극한 강수 현상의 예측을 통한 사회경제적 영향 평가와 지역 기후 대응 전략 개발이 점점 더 중요해질 것이다. 향후 연구에서는 극한 강수의 발생 및 강도의 단기적 예측력을 향상할 방법에 대해 연구를 진행하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Ayugi, B., Dike, V., Ngoma, H., Babausmail, H., Mumo, R. and Ongoma, V., 2021, Future changes in precipitation extremes over East Africa based on CMIP6 models. *Water*, 13, 2358.
- Black, E., Slingo, J. and Sperber, K.R., 2003, An observational study of the relationship between excessively strong short rains in coastal East Africa and Indian Ocean SST. *Monthly weather review*, 131, 74-94.
- Climate Change Knowledge Portal, (n.d.), <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/kenya/climate-data-historical> (n.d.).
- Climate Data Guide, 2024, <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni> (March 20, 2024).
- Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, 2021, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6?tab=overview> (March 23, 2021).
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J. and Taylor, K.E., 2016, Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958.
- Gimeno-Sotelo, L. and Gimeno, L., 2023, Where does the link between atmospheric moisture transport and extreme precipitation matter?. *Weather and Climate Extremes*, 39, 100536.
- Hashizume, M., Terao, T. and Minakawa, N., 2009, The Indian Ocean Dipole and malaria risk in the highlands of western Kenya. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 1857-1862.
- Hirahara, S., Ishii, M. and Fukuda, Y., 2014, Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *Journal of Climate*, 27, 57-75.
- Hocke, K., Bernet, L., Wang, W., Mätzler, C., Hervo, M. and Haefele, A., 2021, Integrated water vapor during rain and rain-free conditions above the Swiss Plateau. *Climate*, 9, 105.
- IPCC, 2021, Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V.P., Zhai, A.,

- Pirani, S.L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., Caud, Y., Chen, L., Goldfarb, M.I., Gomis, M., Huang, K., Leitzell, E., Lonnoy, J.B.R., Matthews, T.K., Maycock, T., Waterfield, O., Yelekçi, R., Yu, and Zhou, B. (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3-32, doi:10.1017/9781009157896.001.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Celliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Ryenolds, R., Jenne, R. and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-472.
- Kenya Meteorological Department (KMD), 2023, <https://meteo.go.ke/sites/default/files/monthly-forecast/December%202023%20Monthly%20weather%20Forecast.pdf>. (November 30, 2023).
- Kwon, Y., Park, C., Back, S.-Y., Son, S.-W., Kim, J. and Cha, E. J., 2022, Influence of Atmospheric Rivers on Regional Precipitation in South Korea. *Atmosphere*, 32, 135-148, <https://doi.org/10.14191/ATMOS.2022.32.2.135> (in Korean with English abstract).
- Lavers, D.A., Allan, R.P., Villarini, G., Lloyd-Hughes, B., Brayshaw, D.J. and Wade, A.J., 2013, Future changes in atmospheric rivers and their implications for winter flooding in Britain. *Environmental Research Letters*, 8, 034010.
- Lavers, D.A. and Villarini, G., 2013, Atmospheric rivers and flooding over the central United States. *Journal of Climate*, 26, 7829-7836.
- MacLeod, D., Kolstad, E.W., Michaelides, K. and Singer, M.B., 2024, Sensitivity of rainfall extremes to unprecedented Indian Ocean Dipole events. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023 GL105258.
- Macharia, J.M., Ngetich, F.K. and Shisanya, C.A., 2020, Comparison of satellite remote sensing derived precipitation estimates and observed data in Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*, 284, 107875.
- Mahto, S.S., Nayak, M.A., Lettenmaier, D.P. and Mishra, V., 2023, Atmospheric rivers that make landfall in India are associated with flooding. *Communications Earth & Environment*, 4, 120.
- Namitha, M.R. and Ravikumar, V., 2018, Analysis of extreme rainfall events and calculation of return levels using generalised extreme value distribution. *Indian Journal of Pure & applied Physics*, 6, 1309-1316.
- OCHA, 2019, <https://www.unocha.org/publications/report/kenya/kenya-flash-update-1-floods-30-october-2019> (October 30, 2019).
- OCHA, 2023, <https://www.unocha.org/publications/report/kenya/kenya-humanitarian-impact-heavy-rains-and-flooding-flash-update-2-20-november-2023> (November 20, 2023).
- Owiti, Z., Ogallo, L.A. and Mutemi, J., 2008, Linkages between the Indian Ocean Dipole and East African seasonal rainfall anomalies. *Journal of Kenya Meteorological Society*, 2, 3-17.
- Palmer, P.I., Wainwright, C.M., Dong, B., Maidment, R.I., Wheeler, K.G., Gedney, N., Hickman, J.E., Madani, N., Folwell, S.S., Abdo, G., Allan, R.P., Black, E.C.L., Feng, L., Gudoshava, M., Haines, K., Huntingford, C., Kilavi, M., Lunt, M.F., Shaaban, A. and Turner, A.G., 2023, Drivers and impacts of Eastern African rainfall variability. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 254-270.
- Polade, S.D., Gershunov, A., Cayan, D.R., Dettinger, M.D. and Pierce, D.W., 2017, Precipitation in a warming world: Assessing projected hydro-climate changes in California and other Mediterranean climate regions. *Scientific reports*, 7, 10783.
- Wainwright, C.M., Finney, D.L., Kilavi, M., Black, E. and Marsham, J.H., 2021, Extreme rainfall in East Africa, October 2019-January 2020 and context under future climate change. *Weather*, 76, 26-31.
- World Weather Attribution (WWA), 2023, <https://www.world-weatherattribution.org/climate-change-indian-ocean-dipole-compounding-natural-hazards-and-high-vulnerability-increased-severity-of-flooding-in-the-horn-of-africa/> (December 7, 2023).
- Xie, P. and Arkin, P.A., 1997, Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2539-2558.
- Yang, W., Seager, R., Cane, M.A. and Lyon, B., 2015, The annual cycle of East African precipitation. *Journal of Climate*, 28, 2385-2404.