

OPTIMIZING AGRICULTURAL WATER PRODUCTIVITY
FOR FOOD SECURITY UNDER CLIMATE CHANGE:
EVIDENCE FROM ALGERIA

OPTYMALIZACJA PRODUKTYWNOŚCI WODY W ROLNICTWIE
W CELU ZAPEWNIENIA BEZPIECZEŃSTWA ŻYWNOŚCIOWEGO
W WARUNKACH ZMIAN KLIMATU. PRZYPADEK ALGERII

ZINELAABIDINE TOUIDJENI
NOUSSEIBA MAOUGAL
SAMIR MEHIEDDINE

Citation: Toudjani, Z., Maougal, N., & Mehieddine, S. (2026). Optimizing Agricultural Water Productivity for Food Security Under Climate Change: Evidence from Algeria / Optymalizacja produktywności wody w rolnictwie w celu zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego w warunkach zmian klimatu. Przypadek Algierii. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics*, 388(3), 82–105. <https://doi.org/10.30858/zer/221026>

Abstract

Aim: Agricultural water productivity is a critical determinant of food security in arid and semi-arid countries such as Algeria, where climate change is intensifying water scarcity and pressure on irrigation-dependent agriculture. This study assesses the current state of agricultural water productivity in Algeria and examines its potential as a demand-management instrument to strengthen national food security under climate stress.

Material and methods: This study employs a quantitative and qualitative desk-research approach using secondary data for the period 2016–2022 from Arab Organization for Agricultural Development and Algerian national reports, complemented by demographic projections to 2050 (Population Reference Bureau) and national water-resource indicators (FAOSTAT, AQUASTAT). The analysis applies biophysical water productivity (BWP) metrics, and quantifies the water footprint (WF, m³/kg) by distinguishing blue and green components based on Mekonnen and Hoekstra's datasets. It also estimates imported virtual water embodied in food imports to capture external water dependence, and benchmarks Algeria's performance against global reference levels, supported by a policy-oriented interpretive assessment.

Results: Water productivity for major food products, especially cereals, remains overall below international benchmarks, indicating substantial scope for efficiency gains across commodities. Reliance on

Zinelaabidine Toudjani, PhD, Abdelhamid Mehri Constantine 2 University, Nouvelle Ville Ali Mendjeli, P.O. Box 67A, Constantine 25067, Algeria. (zinelaabidine.toudjani@univ-constantine2.dz).  <https://orcid.org/0000-0001-6237-9755>
Nousseiba Maougal, PhD, Abdelhamid Mehri Constantine 2 University, Nouvelle Ville Ali Mendjeli, P.O. Box 67A, Constantine 25067, Algeria. (nousseiba.maougal@univ-constantine2.dz).  <https://orcid.org/0009-0000-6306-2717>
Samir Mehieddine, PhD, Mohammed Seddik Benyahia University, P.O. Box 98, Ouled Aissa, 18000 Jijel, Algeria. (samir.mehieddine@univ-jijel.dz).  <https://orcid.org/0009-0008-0914-6854>

imported virtual water for strategic commodities increases exposure to external water resources through trade. Limited modern irrigation uptake, continued traditional surface irrigation, and persistent agronomic and farmer-training gaps constrain output and heighten vulnerability to climate-induced stress.

Conclusions: Improving agricultural water productivity is essential for reinforcing Algeria's long-term food security. A coordinated strategy integrating technological modernization, capacity building, and supportive policy reforms can reduce water-scarcity pressures and strengthen climate resilience by prioritizing "more crop per drop" as a national objective.

Keywords: Q11, Q18, Q25, Q54.

JEL codes: water scarcity, food security, water footprint, agricultural water productivity, Algeria.

Abstrakt

Cel: Produktywność wody w rolnictwie jest kluczowym czynnikiem determinującym bezpieczeństwo żywnościowe w krajach suchych i półsuchych, takich jak Algieria, gdzie zmiany klimatu nasilają niedobór wody oraz presję na zależne od nawadniania rolnictwo. Celem badania jest ocena obecnego poziomu produktywności wody w algierskim rolnictwie oraz analiza jej potencjału jako instrumentu zarządzania popytem na wodę, służącego wzmocnieniu bezpieczeństwa żywnościowego kraju w warunkach presji klimatycznej.

Materiał i metody: W badaniu zastosowano ilościowe i jakościowe podejście oparte na analizie danych zastanych, wykorzystując dane wtórne za lata 2016–2022 pochodzące z Arabskiej Organizacji Rozwoju Rolnictwa (Arab Organization for Agricultural Development) oraz krajowych raportów algierskich, uzupełnione o prognozy demograficzne do 2050 r. (Population Reference Bureau), a także krajowe wskaźniki zasobów wodnych (FAOSTAT, AQUASTAT). W analizie zastosowano mierniki biofizycznej produktywności wody (biophysical water productivity – BWP) oraz oszacowano ślad wodny (water footprint – WF, m³/kg), z rozróżnieniem na komponent niebieski i zielony, na podstawie zbiorów danych Mekonnen i Hoekstry. Oszacowano również ilość importowanej wody wirtualnej zawartej w imporcie żywności w celu określenia zewnętrznej zależności od zasobów wodnych, a wyniki Algierii porównano z globalnymi wartościami referencyjnymi. Analizę uzupełniono o interpretację ukierunkowaną na aspekty polityki publicznej.

Wyniki: Produktywność wody w przypadku głównych produktów żywnościowych, w szczególności zbóż, pozostaje ogólnie niższa od międzynarodowych wartości referencyjnych, co wskazuje na znaczny potencjał poprawy efektywności w odniesieniu do poszczególnych grup produktów. Uzależnienie od importowanej wody wirtualnej zawartej w strategicznych produktach żywnościowych zwiększa ekspozycję na zewnętrzne zasoby wodne poprzez wymianę handlową. Ograniczone wykorzystanie nowoczesnych systemów nawadniania, utrzymujące się stosowanie tradycyjnego nawadniania powierzchniowego oraz niedostatki w zakresie praktyk agrotechnicznych i szkolenia rolników ograniczają wielkość produkcji i zwiększają podatność rolnictwa na skutki zmian klimatu.

Wnioski: Poprawa produktywności wody w rolnictwie jest niezbędna dla wzmocnienia długoterminowego bezpieczeństwa żywnościowego Algierii. Skoordynowana strategia obejmująca modernizację technologiczną, rozwój kompetencji oraz wspierające reformy polityki publicznej może ograniczyć presję związaną z niedoborem wody i zwiększyć odporność na zmiany klimatu poprzez nadanie priorytetu zasadzie „więcej plonów z każdej kropli wody” jako celowi o znaczeniu krajowym.

Słowa kluczowe: Q11, Q18, Q25, Q54.

Kody JEL: niedobór wody, bezpieczeństwo żywnościowe, ślad wodny, produktywność wody w rolnictwie, Algieria.

Introduction

Water plays an essential role in sustaining life and development. As societies have evolved, access to water has become a fundamental public service – often prioritized above electricity, sanitation, and other basic needs (Gleick et al., 2002; World Water Assessment Programme, 2003). Historically, water

Wstęp

Woda odgrywa zasadniczą rolę w podtrzymywaniu życia i rozwoju. W miarę ewolucji społeczeństw dostęp do wody stał się podstawową usługą publiczną – często traktowaną priorytetowo względem energii elektrycznej, zaplecza sanitarnego i innych podstawowych potrzeb (Gleick i in., 2002; World

was not treated as an economic good due to its perceived abundance. However, rapid population growth, economic development, and the expansion of water-intensive human activities have placed immense pressure on freshwater resources worldwide (Kılıç, 2020; Simonovic & Breach, 2020). Global freshwater consumption has increased sixfold over the past century, outpacing population growth by a factor of two (Boretti & Rosa, 2019; UNESCO World Water Assessment Programme, 2021). Agriculture remains the largest consumer of water, accounting for about 69% of global withdrawals and up to 95% in developing countries (UNESCO World Water Assessment Programme, 2021). Meeting future food demand – expected to rise by 60% by 2050 – will intensify the competition for limited water resources (Boretti & Rosa, 2019; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2015a).

The intricate relationship between climate, water, and food has emerged as one of the defining global challenges of the 21st century (Borowski, 2020; Vinca et al., 2021). Climate change – manifested through rising temperatures, erratic rainfall, and recurrent droughts – has disrupted hydrological cycles and reduced the reliability of freshwater supplies (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023; Olmstead, 2010; Wu et al., 2015). These shifts threaten food security and sustainable development, particularly in developing countries reliant on rain-fed agriculture (IPCC, 2014; United Nations Development Programme [UNDP], 2008). The IPCC (2013) projects that such climatic changes could increase global food prices by 3–84% by 2050, worsening inequalities in access to essential resources.

Algeria lies at the core of this water–climate–food nexus. With a total area of 2.38 million km², it is the largest country in Africa yet among the most water-scarce. Agriculture covers roughly 8.5 million hectares, and the sector consumes about 64% of total renewable water resources (Bessaoud et al., 2019; FAO, 2015b). Despite contributing minimally to global greenhouse gas emissions – ranging from 102.17 to 132.43 million tons of CO₂ equivalent, with the energy sector responsible for about 75% (Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables [MEER], 2019) – Algeria is among the countries most vulnerable to climate change, classified as one of the 24 global “hot spots” and the most exposed in North Africa (Bensmaine, 2022; Schilling et al., 2020).

Regional climate studies confirm this vulnerability. Average temperatures in Africa have risen by +0.3°C per decade since 1991 (World Meteorological Organization [WMO], 2022), and the Maghreb has

Water Assessment Programme, 2003). W przeszłości woda nie była traktowana jako dobro ekonomiczne, jako że jej zasób postrzegano jako obfity. Jednak szybki wzrost populacji, rozwój gospodarczy i ekspansja wodochłonnej działalności człowieka wywarły ogromną presję na zasoby słodkiej wody na całym świecie (Kılıç, 2020; Simonovic i Breach, 2020). W ciągu ostatniego stulecia globalne zużycie słodkiej wody wzrosło sześciokrotnie, rosnąc dwukrotnie szybciej niż liczba ludności (Boretti i Rosa, 2019; UNESCO World Water Assessment Programme, 2021). Rolnictwo jest sektorem pochłaniającym najwięcej wody, odpowiadając za około 69% globalnego poboru wody, a w krajach rozwijających się nawet 95% poboru (UNESCO World Water Assessment Programme, 2021). Zaspokojenie przyszłego popytu na żywność – który do 2050 r. ma wzrosnąć o 60% – zwiększy rywalizację o ograniczone zasoby wody (Boretti i Rosa, 2019; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2015a).

Złożona zależność między klimatem, wodą i żywnością stała się jednym z najważniejszych globalnych wyzwań XXI w. (Borowski, 2020; Vinca i in., 2021). Zmiany klimatyczne, objawiające się wzrostem temperatur, nieregularnymi opadami deszczu i nawracającymi suszami, zakłóciły cykle hydrologiczne i zmniejszyły niezawodność dostaw słodkiej wody (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023; Olmstead, 2010; Wu i in., 2015). Zmiany te zagrażają bezpieczeństwu żywnościowemu i zrównoważonemu rozwojowi, szczególnie w krajach rozwijających się, które są zależne od rolnictwa zależnego od opadów (rain-fed agriculture) (IPCC, 2014; United Nations Development Programme [UNDP], 2007). IPCC (2013) przewiduje, że do roku 2050 takie zmiany klimatyczne mogą zwiększyć globalne ceny żywności o od 3 do 84%, co pogłębi nierówności w dostępie do podstawowych zasobów.

Algieria jest krajem szczególnie dotkniętym przez wzajemne oddziaływanie tych trzech czynników: wody, klimatu i żywności. Z całkowitą powierzchnią wynoszącą 2,38 mln km², jest to największy kraj w Afryce, a jednocześnie jeden z najbardziej ubogich w wodę. Na potrzeby rolnictwa przeznaczono około 8,5 mln ha, a sektor ten zużywa około 64% całkowitych odnawialnych zasobów wodnych (Bessaoud i in., 2019; FAO, 2015b). Pomimo minimalnego udziału w globalnej emisji gazów cieplarnianych – wynoszącego od 102,17 do 132,43 mln t ekwiwalentu CO₂, przy czym sektor energetyczny odpowiada za około 75% (Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables [MEER], 2019) – Algieria jest jednym z krajów najbardziej narażonych na zmiany klimatu, sklasyfikowanym jako jeden z 24 globalnych

already experienced an increase exceeding 1°C over the past century (Kostopoulou & Jones, 2005; UNDP, 2009). Future projections indicate a 2°C to 4°C rise across North Africa by 2100, with Algeria's warming rate expected to double the global average (Bensmaine, 2022; IPCC, 2022). Precipitation has declined by 40% in western, 30% in central, and 20% in eastern Algeria, drastically affecting surface runoff, groundwater recharge, and dam storage (MEER, 2019). Studies further suggest that by 2030, a 0.5°C temperature increase could reduce national precipitation by 10%, surface runoff by 15%, and crop yields by up to 30% (Benblida & Thivet, 2010; Clima-Med, n.d.). These climatic pressures exacerbate Algeria's structural water deficit, amplifying risks to agricultural production and national food security.

Historically, Algeria's water policy has focused on supply-side management – building dams, drilling wells, and expanding desalination to meet rising demand (Drouiche et al., 2012; Kherbach, 2020; Oulmane et al., 2022). While effective in earlier decades, this “hard path” approach has reached its physical and fiscal limits. A sustainable future requires a strategic pivot toward demand-side management, which emphasizes efficient water use, institutional reforms, and behavioral change (Durán-Sánchez et al., 2018; Wutich et al., 2014).

Within this framework, enhancing agricultural water productivity stands out as a cornerstone for balancing limited resources with rising food needs. Defined as the amount of agricultural output obtained per unit of water used (Molden et al., 2001; World Bank, 2025), water productivity captures both biophysical and economic efficiency (Kumar et al., 2017; Perry & Steduto, 2017). Improving it enables the production of more food with less water, helping to mitigate scarcity and support food security (Rijsberman, 2002; Scheierling et al., 2016). Evidence from Morocco and China shows that technological innovations, such as drip irrigation, can double yields and save up to 50% of irrigation water (Aabad et al., 2017; Yang et al., 2023). However, productivity gains also depend on broader agricultural conditions – such as credit access, markets, and technology diffusion (Perry, 2018; Perry & Steduto, 2017).

This study therefore aims to critically assess the current state of agricultural water productivity in Algeria, exploring its potential as a key instrument of demand management to enhance national food security under intensifying climate stress. The primary objectives of the study are:

„gorących punktów” i państwem najbardziej narażonym w Afryce Północnej (Bensmaine, 2022; Schilling i in., 2020).

Potwierdzają to regionalne badania klimatu. Od 1991 roku średnie temperatury w Afryce rosły o +0,3°C na dekadę (World Meteorological Organization [WMO], 2022). W ciągu ostatniego stulecia w Maghrebie odnotowano wzrost przekraczający 1°C (Kostopoulou i Jones, 2005; UNDP, 2009). Prognozy na przyszłość przewidują wzrost temperatury o od 2°C do 4°C w całej Afryce Północnej do 2100 r., przy czym oczekuje się, że tempo ocieplenia w Algierii dwukrotnie przekroczy średnią globalną (Bensmaine, 2022; IPCC, 2022). Wielkość opadów spadła o 40% w zachodniej, 30% w środkowej i 20% we wschodniej Algierii, drastycznie wpływając na spływ powierzchniowy, zasilenie wód gruntowych i magazynowanie w zbiornikach retencyjnych (MEER, 2019). Badania wskazują ponadto, że do 2030 r. wzrost temperatury o 0,5°C może zmniejszyć opady w kraju o 10%, spływ powierzchniowy o 15%, a plony nawet o 30% (Benblida i Thivet, 2010; Clima-Med, n.d.). Powyższe czynniki składające się na presję klimatyczną pogłębiają strukturalny deficyt wody w Algierii, zwiększając zagrożenia dla produkcji rolnej i krajowego bezpieczeństwa żywnościowego.

Historycznie ujmując, polityka wodna Algierii koncentrowała się na zarządzaniu podażą, czyli budowaniu tam, wierceniu studni i zwiększaniu potencjału w zakresie odsalania w celu zaspokojenia rosnącego popytu (Drouiche i in., 2012; Kherbach, 2020; Oulmane i in., 2022). Choć podejście „twardej ścieżki” okazało się skuteczne w poprzednich dekadach, osiągnęło ono swoje fizyczne i fiskalne granice. Zrównoważona przyszłość wymaga dokonania strategicznego zwrotu w kierunku zarządzania popytem, które kładzie nacisk na efektywne wykorzystanie wody, reformy instytucjonalne i zmianę zachowań (Durán-Sánchez i in., 2018; Wutich i in., 2014).

W tym kontekście zwiększenie produktywności wody w rolnictwie ma zasadnicze znaczenie dla zrównoważenia ograniczonych zasobów z rosnącym zapotrzebowaniem na żywność. Produktywność wody, zdefiniowana jako ilość produkcji rolnej uzyskanej na jednostkę zużytej wody (Molden i in., 2001; World Bank, 2025), obejmuje zarówno wydajność biofizyczną, jak i ekonomiczną (Kumar i in., 2017; Perry i Steduto, 2017). Poprawa produktywności wody umożliwia produkcję większej ilości żywności przy mniejszym zużyciu wody, co przyczynia się do łagodzenia niedoborów i wspierania bezpieczeństwa żywnościowego (Rijsberman, 2002; Scheierling i in., 2016). Badania przeprowadzone w Maroku i Chinach wskazują, że innowacje technologiczne, takie jak

- (i) to quantify the severity of Algeria's water scarcity challenge;
- (ii) to present and analyze data on the current levels of water productivity and water footprint for key food crops;
- (iii) to discuss the implications of these findings and propose a strategic policy framework for improvement.

Methods

This study employs a quantitative and qualitative desk research methodology, combined with a critical policy analysis approach. The research is based on the collection, synthesis, and analysis of secondary data from a wide range of sources. This methodology was chosen as it allows for a comprehensive assessment of Algeria's water and agricultural situation by leveraging existing data and scholarly work. The process involved several key steps:

- **Data Collection:** Data on water resources, population, agricultural production, and water use were gathered from international databases, including the FAO (FAOSTAT and AQUASTAT), the World Bank's World Development Indicators (WDI), the Population Reference Bureau (PRB), and the resources of Water Footprint Implementation and Water Footprint Network (WFI & WFN). National data were sourced from reports by the Arab Organization for Agricultural Development (AOAD) and Algerian government agencies where available.
- **Metric Calculation and Analysis:** Key performance indicators were calculated and analyzed to provide a quantitative assessment of the situation.

nawadnianie kropelkowe, mogą podwoić plony i uzyskać oszczędności wody do nawadniania na poziomie 50% (Aabad i in., 2017; Yang i in., 2023). Wzrost produktywności zależy jednak również od szerszych warunków panujących w rolnictwie – takich jak dostęp do kredytów i rynków oraz rozpowszechnianie technologii (Perry, 2018; Perry i Steduto, 2017).

Niniejsze badanie ma zatem na celu dokonanie krytycznej oceny bieżącego stanu produktywności wody w algierskim rolnictwie i sprawdzenie jej potencjału jako kluczowego instrumentu zarządzania popytem na potrzeby zwiększenia krajowego bezpieczeństwa żywnościowego w warunkach nasilającej się presji klimatycznej. Głównymi celami badania są:

- (i) określenie skali niedoboru wody w Algierii;
- (ii) przedstawienie i przeanalizowanie danych na temat obecnych poziomów produktywności wody i śladu wodnego dla kluczowych upraw żywności;
- (iii) omówienie skutków wynikających z dokonanych ustaleń i zaproponowanie strategicznych ram polityki na rzecz poprawy sytuacji.

Metody

W badaniu zastosowano ilościową i jakościową metodologię analizy danych zastanych (desk research) w połączeniu z krytyczną analizą polityk. Badanie opiera się na gromadzeniu, syntezie i analizie danych wtórnych pochodzących z szerokiego zakresu źródeł. Metodologia ta została wybrana, ponieważ umożliwia przeprowadzenie kompleksowej oceny sytuacji wodnej i rolniczej w Algierii poprzez wykorzystanie dotychczasowych danych i prac naukowych. Proces ten obejmował kilka kluczowych kroków:

- **Gromadzenie danych:** Dane dotyczące zasobów wodnych, populacji, produkcji rolnej i zużycia wody zostały zebrane z międzynarodowych baz danych, w tym FAO (FAOSTAT i AQUASTAT), Banku Światowego (World Development Indicators – WDI), Biura Informacji o Ludności (Population Reference Bureau, PRB), a także zasobów organizacji Water Footprint Implementation i Water Footprint Network (WFI i WFN). Dane krajowe pochodziły z raportów Arabskiej Organizacji Rozwoju Rolnictwa (Arab Organization for Agricultural Development, AOAD) i algierskich agencji rządowych, o ile były one dostępne.
- **Obliczanie i analiza wskaźników:** Kluczowe wskaźniki efektywności zostały obliczone i przeanalizowane w celu zapewnienia ilościowej oceny sytuacji.

Table 1. Data sources, extracted variables, and coverage**Tabela 1. Źródła danych, wyodrębnione zmienne i zakresy przestrzenne**

Data source / Źródło danych	Extracted variables used in this study / Wyodrębnione zmienne wykorzystane w tym badaniu	Spatial coverage / Zakres przestrzenny	Temporal coverage / Zakres czasowy	Analytical role / Rola analityczna
FAOSTAT (FAO, 2025b)	Production and selected food-balance indicators; contextual crop and livestock statistics / Wskaźniki dot. produkcji i wybrane wskaźniki bilansu żywnościowego; kontekstowe statystyki dotyczące upraw i zwierząt gospodarskich	National (Algeria); global benchmarks / Krajowy (Algieria); globalne wartości odniesienia	Annual (2016–2022) / Roczny (2016–2022)	Contextual benchmarking and consistency checks / Kontekstowe oceny porównawcze i kontrole spójności
AOAD (2019, 2023)	Output volumes for major crop and animal products / Wielkość produkcji głównych roślin uprawnych i produktów zwierzęcych	National (Algeria) / Krajowy (Algieria)	Annual (2016–2022) / Roczny (2016–2022)	Core inputs for product-level productivity calculations / Podstawowe dane wejściowe do obliczeń produktywności na poziomie produktu
PRB (2015)	Population projections and demographic indicators / Prognozy ludności i wskaźniki demograficzne	National (Algeria) / Krajowy (Algieria)	Projections (to 2050) / Prognozy (do 2050 r.)	Demographic trajectory used for per-capita water availability analysis / Projekcja demograficzna wykorzystana do analizy dostępności wody na mieszkańca
AQUASTAT (FAO, 2025a)	Renewable water resources, withdrawals, and national water indicators / Odnawialne zasoby wodne, pobór i krajowe wskaźniki wodne	National (Algeria) / Krajowy (Algieria)	Latest available estimates / Najnowsze dostępne dane szacunkowe	National water-scarcity and water-balance context / Krajowy kontekst niedoboru wody i bilansu wodnego
Mekonnen & Hoekstra (2010a, 2010b)	Blue and green water footprint coefficients for crops and animal products / Współczynniki śladu dla wody niebieskiej i zielonej dla upraw i produktów zwierzęcych	Global coefficient datasets / Globalne zbiory współczynników	Baseline coefficients / Współczynniki bazowe	Derivation of blue/green footprint metrics and comparisons / Wyznaczanie wskaźników i porównań dla śladu dla wody niebieskiej/zielonej
WFI & WFN (2020)	Reference footprint indicators and methodological benchmarks / Wskaźniki śladu referencyjnego i metodologiczne wartości odniesienia	Global / Globalny	Reference values / Wartości odniesienia	Benchmarking of footprint results / Analiza porównawcza wyników śladu
WDI (World Bank, 2025)	Selected macro indicators related to water and development / Wybrane wskaźniki makro związane z wodą i rozwojem	National (Algeria) and global reference aggregates / Krajowe (Algieria) i globalne agregaty danych	Annual (varies by indicator) / Roczny (w zależności od wskaźnika)	Supplementary contextual indicators / Dodatkowe wskaźniki kontekstowe

Source: authors' compilation.

Źródło: opracowanie własne autorów.

Table 1 summarizes the main data sources, extracted variables, and the temporal and spatial coverage used in this study.

- **Biophysical Water Productivity (BWP):** This was calculated for major food products using the formula: $BWP (kg/m^3) = \text{total biomass production or yield (kg)} / \text{total volume of water used (m}^3\text{)}$. Production data was sourced from AOAD (2019, 2023) and water use data for each

Tabela 1 zestawia główne źródła danych, wyodrębnione zmienne oraz zakres czasowy i przestrzenny wykorzystany w niniejszym badaniu.

- **Biofizyczna produktywność wody (biophysical water productivity – BWP):** Obliczona dla głównych produktów żywnościowych przy użyciu następującego wzoru: $BWP (kg/m^3) = \text{całkowita produkcja biomasy lub wydajność (kg)} / \text{całkowita objętość zużytej wody (m}^3\text{)}$. Dane dotyczące

product (needed) was derived from the analysis of Mekonnen and Hoekstra (2010a, 2010b).

- **Water Footprint (WF):** Data on the blue and green water footprint¹ for key crops were compiled from the work of Mekonnen and Hoekstra (2010a) and the WFI and WFN (2020) to calculate and compare Algeria's performance against international benchmarks.
- **Comparative Analysis:** The calculated metrics for Algeria were systematically compared with world averages and data from selected comparable countries. This comparative approach helps to contextualize Algeria's performance and highlight the extent of the "productivity gap" that needs to be addressed.
- **Critical Review:** The quantitative results were interpreted within the broader context of Algeria's agricultural policies, common farming practices, and the known challenges of the sector. This involved a critical reading of existing academic literature and policy documents to identify the underlying causes of the observed results.

By integrating these steps, this study provides a data-driven narrative that first presents the empirical evidence and then interprets its meaning and implications.

Results and Discussion

This section presents the empirical findings of the study, starting with the macro-level context of water scarcity and progressively focusing on specific metrics of agricultural water use and productivity in Algeria.

The Trajectory of Water Scarcity in Algeria

Algeria's water scarcity dynamics are shaped not only by demographic pressure but also by a pronounced north-south climatic gradient, where precipitation is largely concentrated along the Mediterranean coastal belt and declines sharply across the High Plateaus toward the Saharan region. This spatial contrast has direct implications for agricultural systems, as production zones increasingly depend on irrigation to stabilize yields. Under accelerating climate pressure, higher temperatures and recurrent drought episodes are expected to intensify evapotranspiration demand

¹ Blue water refers to surface and groundwater withdrawn for irrigation, whereas green water refers to effective rainfall stored in the soil and consumed by crops (Hoekstra et al., 2011; Mekonnen & Hoekstra, 2010b).

produkcji pochodzą z AOAD (2019, 2023), a dane dotyczące zużycia wody dla każdego (potrzebnego) produktu pochodzą z analizy przeprowadzonej przez Mekonnena i Hoekstrę (2010a, 2010b).

- **Ślad wodny (water footprint – WF):** Dane dotyczące śladu dla wody niebieskiej i zielonej¹ dla kluczowych upraw zostały zebrane na podstawie prac Mekonnena i Hoekstry (2010a) oraz Water Footprint Network (WFI i WFN, 2020) w celu obliczenia i porównania wyników Algierii z międzynarodowymi wartościami odniesienia.
- **Analiza porównawcza:** Obliczone wskaźniki dla Algierii były systematycznie porównywane ze średnimi światowymi i danymi z wybranych porównywalnych krajów. Takie podejście porównawcze pomaga w kontekstualizacji wyników Algierii i podkreśleniu zakresu „luki produktywności”, którą należy wyeliminować.
- **Przegląd krytyczny:** Wyniki ilościowe interpretowano w szerszym kontekście polityki rolnej Algierii, powszechnych praktyk rolniczych i znanych wyzwań stojących przed sektorem. Wymagało to krytycznego zapoznania się z dotychczasową literaturą naukową i dokumentami opisującymi politykę w celu zidentyfikowania przyczyn zaobserwowanych wyników.

Łącząc te działania, niniejsze badanie zapewnia analizę opartą na danych, która przede wszystkim przedstawia dowody empiryczne, a następnie interpretuje ich znaczenie i implikacje.

Wyniki i omówienie

Niniejsza sekcja przedstawia wyniki badań empirycznych, zaczynając od kontekstu niedoboru wody na poziomie makro, i stopniowo koncentruje się na konkretnych wskaźnikach zużycia wody i produktywności wody na potrzeby algierskiego rolnictwa.

Projekcja niedoboru wody w Algierii

Dynamika niedoboru wody w Algierii wynika nie tylko z presji demograficznej, lecz także wyraźnego gradientu klimatycznego północ-południe, w którym opady są w dużej mierze skoncentrowane wzdłuż śródziemnomorskiego pasa przybrzeżnego i gwałtownie maleją w kierunku Wyżyny Szottów aż po region Sahary. Ten kontrast przestrzenny ma bezpośredni wpływ na systemy rolnicze, ponieważ strefy produkcyjne w coraz większym stopniu zależą od nawadniania w celu stabilizacji plonów. Oczekuje się, że w wyniku rosnącej presji klimatycznej wyższe

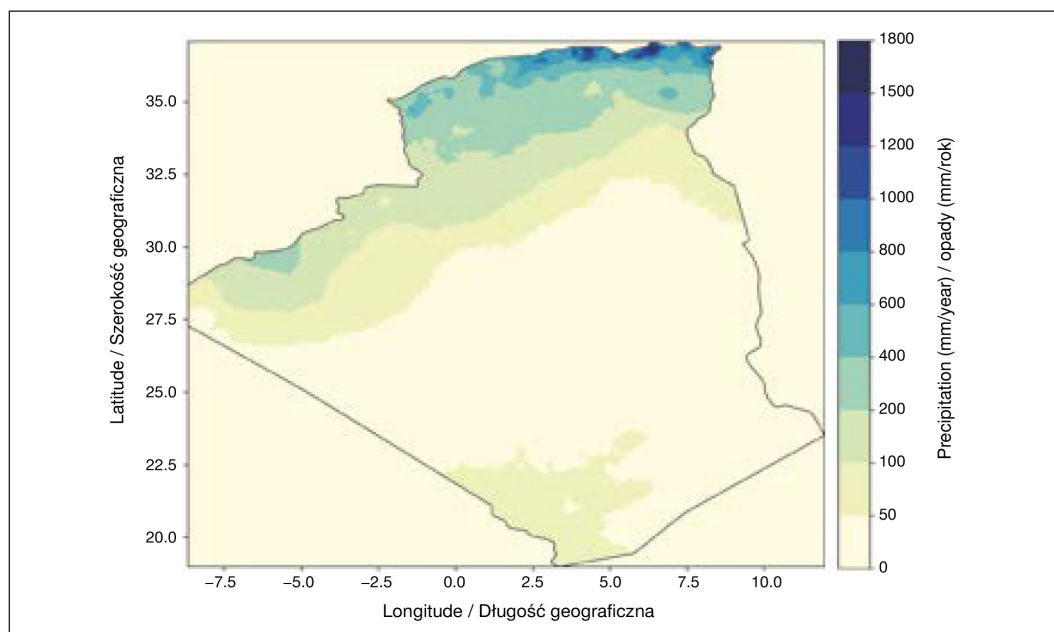
¹ Woda niebieska to wody powierzchniowe i gruntowe pobierane na potrzeby nawadniania, natomiast woda zielona to efektywne opady deszczu magazynowane w glebie i zużywane przez uprawy (Hoekstra i in., 2011; Mekonnen i Hoekstra, 2010b).

and reduce effective water availability, reinforcing the country's structural vulnerability to water stress (IPCC, 2022, 2023; MEER, 2019; WMO, 2022). Figure 1 illustrates this precipitation gradient across Algeria.

temperatury i powtarzające się okresy suszy zwiększą zapotrzebowanie na ewapotranspirację i zmniejszą efektywną dostępność wody, zwiększając strukturalną podatność kraju na stres wodny (IPCC, 2022, 2023; MEER, 2019; WMO, 2022). Rysunek 1 przedstawia gradient opadów w Algierii.

Figure 1. Mean annual precipitation in Algeria (2016–2022)*

Rysunek 1. Średnie roczne opady w Algierii (2016–2022)*



* Note: the figure illustrates the north–south precipitation gradient that frames irrigation dependency and water scarcity dynamics. /

* Uwaga: rysunek przedstawia gradient opadów z północy na południe, który określa zależność od nawadniania i dynamikę niedoboru wody.

Source: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS; Funk et al., 2015); authors' processing and mapping (2016–2022).

Źródło: dane Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS; Funk et al., 2015); opracowanie i mapowanie własne autorów (2016–2022).

Against this hydro-climatic backdrop, the relationship between population growth and declining water availability remains a foundational challenge for Algeria. Table 2 starkly illustrates this trend, charting the inverse relationship between the rising population and the declining per capita share of renewable water resources from the country's independence in 1962 to projections for 2050.

The data in Table 2 clearly depict Algeria's alarming trajectory toward absolute water scarcity. Since independence, the country has witnessed a sharp and continuous decline in renewable water availability per capita – a direct consequence of rapid population growth against a nearly fixed volume of renewable water resources, estimated at about 11.67 billion m³ per year. In 1962, Algeria's per capita share of renewable water stood at 998 m³, already near the global water stress threshold of 1,700 m³.

W tym kontekście hydroklimatycznym związek między wzrostem populacji a malejącą dostępnością wody pozostaje podstawowym wyzwaniem dla Algierii. Tabela 2 wyraźnie ilustruje ten trend, przedstawiając odwrotną zależność między rosnącą liczbą ludności a malejącym udziałem odnawialnych zasobów wodnych w przeliczeniu na mieszkańca od uzyskania przez kraj niepodległości w 1962 r. do prognoz na rok 2050.

Dane w tabeli 2 wyraźnie przedstawiają niepokojącą dla Algierii prognozę absolutnego niedoboru wody. Od czasu uzyskania niepodległości w kraju notuje się gwałtowny i ciągły spadek dostępności odnawialnej wody na mieszkańca, co stanowi bezpośrednią konsekwencję szybkiego wzrostu liczby ludności w stosunku do niemal stałej ilości odnawialnych zasobów wodnych, szacowanej na około 11,67 mld m³ rocznie. W 1962 r. udział wody odnawialnej w przeliczeniu

By 2022, this figure had dropped to 256 m³, placing the country well below the 500 m³ benchmark for absolute water scarcity (Falkenmark et al., 1989). Projections for 2050 suggest a further decline to 193 m³, as the population is expected to reach 60.4 million.

na mieszkańca Algierii wynosił 998 m³, co już zbliżało się do globalnego progu niedoboru wody wynoszącego 1700 m³. Do 2022 r. liczba ta spadła do 256 m³, w wyniku czego kraj plasuje się znacznie poniżej poziomu odniesienia wynoszącego 500 m³ dla absolutnego niedoboru wody (Falkenmark i in., 1989). Prognozy na rok 2050 wskazują na dalszy spadek do 193 m³, ponieważ oczekuje się, że liczba ludności zwiększy się do 60,4 milionów.

Table 2. Evolution of per capita share of renewable water resources compared to population growth in Algeria (1962–2050)

Tabela 2. Zmiana udziału odnawialnych zasobów wodnych na mieszkańca w porównaniu ze wzrostem liczby ludności w Algierii (1962–2050)

Year / Rok	Population (thousands) / Populacja (tys.)	Per capita share of water (m ³ /year) / Ilość wody na mieszkańca (m ³ /rok)
1962	11,692	998,30
1982	20,576	587,10
2002	31,990	367,45
2022	44,903	256,55
2030	49,900	233,80
2050	60,400	193,20

Source: PRB (2015); FAO (2025a).

Źródło: PRB (2015); FAO (2025a).

This steady contraction of water availability underscores Algeria's critical dependence on a finite resource base and its growing vulnerability to water stress. Compounding the problem, water withdrawals already exceed 40% of renewable resources, confirming the country's classification under, the "high water vulnerability" category (FAO2025a; Rijsberman, 2006).

Such conditions reveal that the roots of Algeria's water crisis lie not only in natural scarcity but also in policy orientation. For decades, national water policy has largely emphasized supply-side management – building dams, tapping fossil aquifers, and desalination – while neglecting demand-side measures essential for long-term sustainability (Kherbache, 2020; Oulmane et al., 2022). As climate change further reduces rainfall and intensifies droughts (Talbi & Alani, 2022; UNESCO World Water Assessment Programme, 2022), the strategic pivot toward demand management and efficient water use – particularly in agriculture – becomes not only desirable but imperative.

To complement the long-term contraction in per capita renewable water availability shown in Table 2, forward-looking assessments indicate that the imbalance between supply and demand may widen further under continued demographic and climate pressure. Table 3 therefore reports an aggregate

Ten stały spadek dostępności wody podkreśla krytyczną zależność Algierii od ograniczonej bazy zasobów i jej rosnącą podatność na stres wodny. Pobór wody przekracza już 40% zasobów odnawialnych, co zwiększa problem i potwierdza klasyfikację kraju w kategorii „wysokiej podatności na niedobór wody” (FAO, 2025a; Rijsberman, 2006).

Takie warunki wskazują, że korzenie kryzysu wodnego w Algierii leżą nie tylko w niedoborze naturalnym, ale także w sposobie kształtowania polityki. Przez dziesięciolecia krajowa polityka wodna w dużej mierze kładła nacisk na zarządzanie podażą – budowę zapór, wykorzystanie kopalnych warstw wodonośnych i odsalanie – a jednocześnie zaniedbywano środki po stronie popytu niezbędne dla zapewnienia długoterminowego zrównoważonego rozwoju (Kherbache, 2020; Oulmane i in., 2022). W miarę jak zmiany klimatyczne coraz bardziej ograniczają opady deszczu i nasilają susze (Talbi i Alani, 2022; UNESCO World Water Assessment Programme, 2022) strategiczny zwrot w kierunku zarządzania popytem i efektywnego wykorzystania wody – szczególnie w rolnictwie – staje się nie tylko pożądany, ale wręcz konieczny.

Uzupełnieniem długoterminowego spadku dostępności odnawialnych zasobów wody na mieszkańca, co przedstawiono w tabeli 2, są prognozy wskazujące, że dysproporcja między podażą a popytem może się pogłębiać wraz z utrzymującą się presją

estimate of total national water demand toward 2050, highlighting the scale of the forthcoming constraint (FAO, 2025a).

demograficzną i klimatyczną. Tabela 3 przedstawia zatem zbiorcze szacunki całkowitego krajowego zapotrzebowania na wodę do 2050 r. i zwraca uwagę na skalę przyszłych ograniczeń (FAO, 2025a).

Table 3. Estimation of total water demand in Algeria by 2050

Tabela 3. Oszacowanie całkowitego zapotrzebowania na wodę w Algierii w perspektywie do roku 2050

Sector / Sektor	Estimated water demand (billion m ³ /year) / Szacowane zapotrzebowanie na wodę (mld m ³ /rok)	%
Agriculture / Rolnictwo	10.05	50
Domestic use / Użytek domowy	9.70	48.66
Industrial use / Użytek przemysłowy	0.27	1.34
Total estimated demand / Całkowity szacowany popyt	19.65	100

Source: dauthors' elaboration based on FAO (2025a).

Źródło: opracowanie własne autorów na podstawie FAO (2025a).

With a projected total demand of nearly 20 billion m³ by 2050 and total renewable resources of only ~12 billion m³, Algeria faces a projected deficit of over 7 billion m³. Relying on non-renewable groundwater (approximately 60,000 billion m³) and desalination to fill this gap is unsustainable in the long run. The only viable path forward is to drastically reduce demand, and the largest potential for savings lies in improving the productivity of the agricultural sector.

Agricultural Water Demand in Algeria

The agricultural sector represents the primary consumer of Algeria's scarce water resources and the main source of pressure on the country's limited hydrological balance. As shown in Table 4, meeting the national demand for key food products between 2016 and 2022 required an average of 73.31 billion m³ of water annually – a volume that far exceeds Algeria's renewable water resources, estimated at only 11–12 billion m³ per year.

Of this total, approximately 43.08 billion m³ were derived from domestic production, while 30.23 billion m³ corresponded to imported virtual water² embodied in food imports, indicating a substantial reliance on external water resources to meet national food demand. Import dependency, however, is highly product-specific: while wheat alone accounts for a notably high imported share (56.97%), other commodities are even more externally dependent – such

Przy przewidywanym całkowitym zapotrzebowaniu na poziomie blisko 20 mld m³ do 2050 r. i całkowitych zasobach odnawialnych wynoszących zaledwie około 12 mld m³, Algieria stoi w obliczu potencjalnego deficytu w wysokości ponad 7 mld m³. Uzależnienie od nieodnawialnych wód gruntowych (około 60 000 mld m³) i odsalania w celu wyeliminowania tej luki jest na dłuższą metę działaniem niezrównoważonym. Jedynym realnym działaniem jest tu drastyczne zmniejszenie popytu, a największy potencjał oszczędności tkwi w poprawie produktywności sektora rolnego.

Zapotrzebowanie na wodę w algierskim rolnictwie

Sektor rolniczy jest głównym konsumentem ograniczonych zasobów wodnych Algierii i głównym źródłem presji na ograniczoną równowagę hydrologiczną kraju. Jak wskazano w tabeli 4, zaspokojenie krajowego zapotrzebowania na kluczowe produkty żywnościowe w latach 2016–2022 wymagało średnio 73,31 mld m³ wody rocznie, czyli ilości, która znacznie przekracza odnawialne zasoby wodne Algierii, szacowane jedynie na 11–12 mld m³ rocznie.

Z tej sumy około 43,08 mld m³ pochodziło z produkcji krajowej, podczas gdy 30,23 mld m³ odpowiadało importowanej wodzie wirtualnej² zawartej w żywności importowanej, co wskazuje na znaczną zależność od zewnętrznych zasobów wodnych przy zaspokajaniu krajowego popytu na żywność. Zależność od importu jest jednak wysoce specyficzna dla danego produktu: podczas gdy sama pszenica ma szczególnie wysoki udział w imporcie (56,97%),

² Imported virtual water denotes the freshwater embodied in imported food commodities along their production chain; it is an accounting indicator of external water use associated with trade, not physically transferred or purchased water (Hoekstra et al., 2011; Mekonnen & Hoekstra, 2010a, 2010b).

² Importowana woda wirtualna to słodka woda zawarta w importowanych towarach żywnościowych wzdłuż ich łańcucha produkcyjnego; jest to wskaźnik rachunkowy zewnętrznego zużycia wody związanego z obrotem handlowym, nie jest to woda fizycznie sprzedana lub zakupiona (Hoekstra i in., 2011; Mekonnen i Hoekstra, 2010b, 2010a).

as maize (99.95%), refined sugar (100.00%), rice (99.89%), and oils and fats (88.33%) – whereas fruits, vegetables, and small ruminant products remain largely supplied by domestic water use. This heterogeneity highlights that Algeria's virtual water dependence is concentrated in a subset of strategic staples and highly import-reliant food categories.

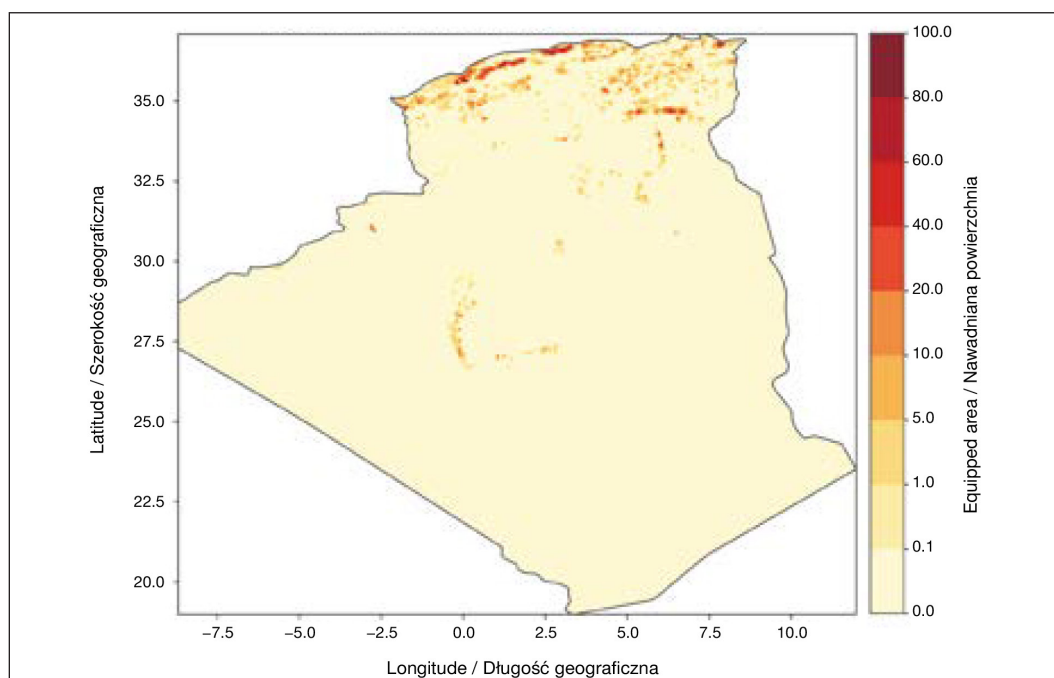
Beyond national aggregates, agricultural water-demand pressure is spatially heterogeneous, reflecting differences in cropping intensity, irrigation development, and agro-climatic conditions across regions. In Algeria, irrigation-equipped areas – and thus potential zones of sustained irrigation demand – tend to concentrate in the main agricultural production belts. This concentration can amplify localized pressure on available supplies, making efficiency-oriented interventions more impactful when targeted toward high-demand systems and priority crops. This spatial pattern is illustrated in Figure 2.

inne towary są importowane w jeszcze większym stopniu, jak np.: kukurydza (99,95%), cukier rafinowany (100,00%), ryż (99,89%) oraz oleje i tłuszcze (88,33%), natomiast owoce, warzywa i produkty pochodzące od kóz i owiec są w dużej mierze uzyskiwane w oparciu o zużycie wody ze źródeł krajowych. Ta niejednorodność oznacza, że zależność Algierii od wody wirtualnej skupia się na strategicznych i wysoce zależnych od importu kategoriach żywności.

Presja na zasoby wody wykorzystywanej w rolnictwie jest przestrzennie zróżnicowana i nie uwzględnia krajowej specyfiki, a zatem różnic w intensywności upraw, stopnia rozwoju nawodnienia oraz warunków agroklimatycznych danego regionu. W Algierii obszary nawadniane, a tym samym potencjalne strefy stałego zapotrzebowania na nawadnianie, są skupione w głównych pasach produkcji rolnej. Skupienie to może zwiększyć lokalną presję na dostępne dostawy, dzięki czemu interwencje zorientowane na wydajność mają większy wpływ, gdy są ukierunkowane na systemy o wysokim popycie i uprawy priorytetowe. Ten wzorec przestrzenny zilustrowano na rysunku 2.

Figure 2. Spatial concentration of irrigation-equipped areas in Algeria (baseline proxy for agricultural water uptake hotspots)*

Rysunek 2. Koncentracja przestrzenna obszarów wyposażonych w systemy nawadniania w Algierii (podstawowy wskaźnik zastępczy dla stref wysokiego poboru wody w rolnictwie)*



Note: * This layer represents the long-term spatial distribution of irrigation infrastructure and is therefore used as a proxy to support the geographic interpretation of agricultural water-demand pressure, rather than a direct measure of withdrawals.

Uwaga: * warstwa ta reprezentuje długoterminowy rozkład przestrzenny infrastruktury nawadniającej i dlatego jest wykorzystywana jako wskaźnik zastępczy na potrzeby geograficznej interpretacji zapotrzebowania na wodę w rolnictwie, a nie jako bezpośrednia miara poboru.

Source: AQUASTAT (FAO, 2025a); Global Map of Irrigation Areas (GMIA v5) (Siebert et al., 2013). Authors' processing and mapping.

Źródło: AQUASTAT (FAO, 2025a); Global Map of Irrigation Areas (GMIA v5) (Siebert i in., 2013). Opracowanie i mapowanie własne autorów.

Table 4 summarizes the corresponding average water volumes required to meet Algeria's major food product needs over 2016–2022.

Tabela 4 podsumowuje odpowiednie średnie ilości wody wymagane do zaspokojenia zapotrzebowania Algierii na główne produkty żywnościowe w latach 2016–2022.

Table 4. Average volume of water used in meeting Algeria's major food products needs for the 2016–2022 period

Tabela 4. Średnia ilość wody wykorzystywanej do zaspokojenia zapotrzebowania Algierii na główne produkty żywnościowe w latach w danym okresie (2016–2022)

Products / Produkty	Average volume of local water (billion m ³ /year) / Średnia ilość wody lokalnej (mld m ³ /rok)	Average volume of imported water (billion m ³ /year) / Średnia ilość wody importowanej (mld m ³ /rok)	Total water volume (billion m ³ /year) / Całkowita ilość wody (mld m ³ /rok)	Local water share (%) / Udział wody lokalnej (%)	Imported water share (%) / Udział wody importowanej (%)
Barley / Jęczmień	3.86	0.95	4.81	80.19	19.81
Cattle and buffalo meat / Mięso wołowe i bawole	4.91	0.78	5.69	86.29	13.71
Eggs / Jaja	1.31	0.00	1.32	99.94	0.06
Fruits (total) / Owoce (ogółem)	5.33	0.30	5.63	94.74	5.26
Maize / Kukurydza	0.00	7.54	7.55	0.05	99.95
Milk and dairy / Mleko i nabiał	6.80	0.81	7.61	89.35	10.65
Oils and fats / Oleje i tłuszcze	0.29	2.23	2.52	11.67	88.33
Poultry meat / Mięso drobiowe	1.60	0.00	1.60	100.00	0.00
Pulses / Rośliny strączkowe	0.30	0.52	0.82	36.94	63.06
Refined sugar / Cukier rafinowany	0.00	2.56	2.56	0.00	100.00
Rice / Ryż	0.00	0.23	0.23	0.11	99.89
Sheep and goat meat / Mięso owcze i kozie	5.40	0.01	5.41	99.78	0.22
Vegetables (total) / Warzywa (ogółem)	2.45	0.01	2.46	99.63	0.37
Wheat / Pszenica	10.80	14.29	25.09	43.03	56.97
Total / Łącznie	43.08	30.23	73.31	58.76	41.24

Source: authors' calculations based on AOAD (2019, 2023); Mekonnen and Hoekstra (2010a, 2010b).

Źródło: obliczenia własne autorów na podstawie: AOAD (2019, 2023); Mekonnen i Hoekstra (2010a, 2010b).

This analysis underscores the severe mismatch between Algeria's renewable water endowment and the volume required to meet national food consumption. Even if all renewable, non-renewable, and treated wastewater resources were fully mobilized, the total available water would still fall far short of this demand. Consequently, Algeria's agricultural system relies heavily on rainfall (green water) and on overexploited Saharan aquifers – whose extraction rates already exceed natural recharge by a factor of three (United Nations Economic Commission for Europe [UNECE], 2020). Such dependency is ecologically unsustainable and economically risky, particularly under climate change, which is projected to reduce precipitation and exacerbate drought frequency.

Analiza ta podkreśla istotną rozbieżność między zasobami wody odnawialnej w Algierii a ilością wymaganą do zaspokojenia krajowej konsumpcji żywności. Nawet gdyby wszystkie odnawialne, nieodnawialne i oczyszczone zasoby ścieków zostały w pełni udostępnione do użytku, całkowita ilość wody dostępnej nadal byłaby znacznie niższa od tego zapotrzebowania. W konsekwencji algierski system rolniczy opiera się w dużej mierze na opadach deszczu (zielona woda) i na nadmiernie eksploatowanych saharjskich warstwach wodonośnych – których wskaźniki wydobywania już trzykrotnie przekraczają naturalne tempo odnawiania (United Nations Economic Commission for Europe [UNECE], 2020). Taka zależność jest ekologicznie nieutrwała i ekonomicznie ryzykowna, szczególnie w obliczu zmian klimatycznych, których spodziewanym

Enhancing agricultural water productivity, therefore, emerges as a strategic imperative. By increasing the yield per unit of water used, Algeria can alleviate pressure on its finite resources, reduce virtual water dependency, and strengthen food security within an increasingly arid and uncertain climate future.

Biophysical Water Productivity: The Core of the Problem

The core issue is not just the volume of water used, but the efficiency of that use. Former UN Secretary-General Kofi Annan (2000) called for a “Blue Revolution” in agriculture – one that focuses not on expanding land or water use, but on producing more crops per drop of water. This principle lies at the heart of sustainable water management, where enhancing water productivity becomes a strategic response to water scarcity and climate stress (Kijne et al., 2009). For Algeria, where water scarcity is structural and climate change further tightens constraints, improving the efficiency of each cubic meter of water used in agriculture is not optional but essential.

Table 5 presents the estimated Biophysical Water Productivity (BWP) for selected key food products in Algeria compared with global averages for the 2016–2022 period. BWP reflects the kilograms of agricultural output produced per cubic meter of water used.

The data reveal a pronounced productivity gap in several strategic commodities. Algeria’s BWP for wheat, barley, and milk – which together account for nearly half of total agricultural water use ($\approx 49.8\%$) – is less than 50% of the global average. This indicates that a large share of scarce water resources generates relatively low physical returns. Conversely, vegetables and maize exhibit BWP values exceeding global averages, demonstrating localized efficiency gains that could serve as benchmarks for wider agricultural improvement.

The disparity across crops reflects differences in climatic conditions, irrigation efficiency, soil fertility, and input use. Despite significant investments in irrigation infrastructure, gravity irrigation still dominates 45% of irrigated areas, with lower efficiency than modern systems such as drip irrigation (Cosgrove & Rijsberman, 2000; FAO, 2025a; Ragab, 2011; UNDP, 2006). Field studies across Algeria – including those in Jijel (Oulmane et al., 2019) and the Mitidja and Habra plains (Amirouche et al., 2020; Chabaca et al., 2014;

wynikiem będzie zmniejszenie opadów i zwiększenie częstotliwości okresów suszy.

Zwiększenie produktywności wody w rolnictwie staje się zatem strategiczną koniecznością. Zwiększając wydajność z jednostki zużytej wody, Algieria może złagodzić presję na swoje ograniczone zasoby, zmniejszyć zależność od wody wirtualnej i zwiększyć bezpieczeństwo żywnościowe zważywszy na coraz bardziej suchy i niepewny klimat.

Biofizyczna produktywność wody: istota problemu

Kluczową kwestią jest nie tylko ilość zużywanej wody, ale także efektywność jej zużycia. Były sekretarz generalny ONZ Kofi Annan (2000) wezwał do „niebieskiej rewolucji” w rolnictwie – wprowadzenia modelu, który nie koncentruje się na zwiększaniu wykorzystania gruntów lub wody, lecz na produkcji większej ilości plonów z kropli wody. Zasada ta leży u podstaw zrównoważonej gospodarki wodnej, w ramach której zwiększenie produktywności wody staje się strategiczną odpowiedzią na jej niedobór i presję klimatyczną (Kijne i in., 2009). W przypadku Algierii, gdzie niedobór wody ma charakter strukturalny, a zmiany klimatyczne jeszcze bardziej wpływają na wprowadzane ograniczenia, poprawa wydajności każdego metra sześciennego wody wykorzystywanej w rolnictwie nie jest działaniem opcjonalnym, lecz niezbędnym.

Tabela 5 przedstawia szacunkową biofizyczną produktywność wody (BWP) dla wybranych kluczowych produktów żywnościowych w Algierii w porównaniu ze średnimi światowymi dla okresu 2016–2022. BWP odpowiada kilogramom produkcji rolnej na metr sześcienny zużytej wody.

Z danych wynika wyraźna luka produktywności dla kilku strategicznych towarów. BWP Algierii dla pszenicy, jęczmienia i mleka, które łącznie stanowią prawie połowę całkowitego zużycia wody w rolnictwie ($\approx 49,8\%$), wynosi mniej niż 50% średniej światowej. Wskazuje to, że duża część ograniczonych zasobów wodnych generuje stosunkowo niski zwrot fizyczny. Z kolei warzywa i kukurydza osiągają wartości BWP przekraczające średnie światowe, co świadczy o lokalnych wzrostach efektywności, które mogłyby służyć jako punkt odniesienia dla szerszej poprawy wydajności rolnictwa.

Rozbieżności między uprawami odzwierciedlają różnice w warunkach klimatycznych, wydajności nawadniania, żyzności gleby i wykorzystaniu nakładów produkcyjnych. Pomimo znacznych inwestycji w infrastrukturę nawadniającą, nawadnianie grawitacyjne nadal przeważa na 45% obszarów, a cechuje się niższą wydajnością niż nowoczesne systemy, takie jak

Tazekrit et al., 2017) – confirm substantial inefficiencies in water use due to outdated equipment, inadequate farmer training, and low adoption of precision technologies.

nawadnianie kropelkowe (Cosgrove i Rijsberman., 2000; FAO, 2025a; Ragab, 2011; UNDP, 2006). Badania terenowe przeprowadzone w całej Algierii, w tym w Dżidża (Oulmane i in., 2019) oraz na równinach Mitidja i Habra, (Amirouche i in., 2020; Chabaca i in., 2014; Tazekrit i in., 2017) potwierdzają znaczną nieefektywność zużycia wody ze względu na kwestie takie jak przestarzały sprzęt, nieodpowiednie szkolenia rolników i niski poziom wykorzystania technologii precyzyjnych.

Table 5. Average Biophysical Water Productivity of major food products in Algeria compared to world average (2016–2022)

Tabela 5. Średnia biofizyczna produktywność wody dla głównych produktów żywnościowych w Algierii w porównaniu ze średnią światową (2016–2022)

Food product / Produkt żywnościowy	BWP in Algeria (kg/m ³) / BWP w Algierii (kg/m ³)	World average (kg/m ³) / Średnia światowa (kg/m ³)	Deviation (kg/m ³) / Odchylenie (kg/m ³)
Milk and dairy production / Produkcja mleka i nabiału	0.50	0.98	–0.48
Barley / Jęczmień	0.35	0.70	–0.35
Wheat / Pszenica	0.29	0.55	–0.26
Sheep and goat meat / Mięso owcze i kozie	0.06	0.10	–0.04
Eggs / Jaja	0.27	0.31	–0.04
Cattle and buffalo meat / Mięso wołowe i bawole	0.03	0.06	–0.03
Poultry meat / Mięso drobiowe	0.27	0.23	+0.04
Pulses / Rośliny strączkowe	0.39	0.32	+0.07
Fruits (total) / Owoce (ogółem)	0.89	0.66	+0.23
Maize / Kukurydza	1.07	0.82	+0.25
Vegetables (total) / Warzywa (ogółem)	4.41	2.95	+1.46

Source: authors' calculations based on AOAD (2019, 2023); Mekonnen and Hoekstra (2010a, 2010b).

Źródło: obliczenia własne autorów na podstawie: AOAD (2019, 2023); Mekonnen i Hoekstra (2010a, 2010b).

Improving Algeria's agricultural water productivity thus requires a shift toward integrated efficiency strategies: upgrading irrigation systems, optimizing fertilizer and pesticide use, adopting resilient crop varieties, and enhancing technical capacity. Achieving even modest gains in BWP for water-intensive crops like wheat and milk could yield substantial water savings or higher output without additional resource pressure – making productivity enhancement a cornerstone for sustainable water and food security in Algeria.

Poprawa produktywności wody w algierskim rolnictwie wymaga zatem przejścia na zintegrowane strategie wydajności: modernizację systemów nawadniania, optymalizację stosowania nawozów i pestycydów, wprowadzenie odpornych odmian upraw i zwiększenie możliwości technicznych. Osiągnięcie nawet niewielkich korzyści w zakresie BWP w przypadku upraw wymagających znacznych ilości wody, takich jak uprawa pszenicy czy produkcja mleka, może przynieść znaczne oszczędności wody lub wyższą produkcję bez dodatkowej presji na zasoby. Tym samym zwiększenie produktywności zapewni zrównoważone bezpieczeństwo wodne i żywnościowe Algierii.

The Water Footprint: A Deeper Look at Inefficiency

The water footprint (WF), expressed in cubic meters of water per kilogram of output (m^3/kg), is the inverse of water productivity (kg/m^3) and quantifies the total amount of water required to produce a specific good or service (Gerbens-Leenes et al., 2013). It encompasses both blue water – surface and groundwater used in irrigation – and green water, which represents rainfall absorbed by crops (Hoekstra et al., 2011). Assessing this indicator provides insight into the efficiency and sustainability of agricultural water use across spatial and climatic contexts.

Table 6 compares the average blue and green water footprints of Algeria's two strategic crops – wheat and potatoes – across several basins with international benchmarks and comparable countries in the Mediterranean region.

Ślad wodny: Analiza nieefektywności

Ślad wodny (WF), wyrażony w metrach sześciennych wody na kilogram produkcji (m^3/kg), jest odwrotnością produktywności wody (kg/m^3) i określa całkowitą ilość wody wymaganą do wyprodukowania określonego towaru lub usługi (Gerbens-Leenes i in., 2013). Obejmuje zarówno wodę niebieską, czyli wody powierzchniowe i gruntowe wykorzystywane do nawadniania, jak i wodę zieloną, która oznacza opady deszczu wchłaniane przez uprawy (Hoekstra i in., 2011). Ocena tego wskaźnika pozwala lepiej zrozumieć efektywność i zrównoważenie wykorzystania wody w rolnictwie w różnych kontekstach przestrzennych i klimatycznych.

W tabeli 6 przedstawiono porównanie śladu dla wody niebieskiej i zielonej w kilku dorzeczach dla dwóch strategicznych upraw w Algierii, pszenicy i ziemniaków, z międzynarodowymi wartościami odniesienia i porównywalnymi krajami w regionie Morza Śródziemnego.

Table 6. Average blue and green water footprint of wheat and potato crops in Algeria compared with the international benchmark and selected countries

Tabela 6. Średni ślad dla wody niebieskiej i zielonej w przypadku upraw pszenicy i ziemniaków w Algierii w porównaniu z międzynarodowymi wartościami odniesienia i wybranymi krajami

Country / Kraj	Crop / Uprawa	River basin / Dorzecze	Green–Blue WF (m^3/t) / Ślad dla wody zielonej-niebieskiej (m^3/t)	Global benchmark (m^3/t) / Globalny poziom odniesienia (m^3/t)	Deviation from benchmark (%) / Odchylenie od poziomu odniesienia (%)
Algeria / Algieria	Wheat / Pszenica	Chelif	3,400	993	+242
		Melrhir	3,553		+258
		Macta	3,525		+255
		Seybouse	2,827		+185
		Average / Średnia	3,355		+238
Morocco / Maroko		Sebou	3,000		+202
Tunisia / Tunezja		(unknown) / (nieznane)	2,400		+142
Egypt / Egipt		Nile	1,100		+11
Spain / Hiszpania		Douro	1,400		+41
Algeria / Algieria	Potatoes / Ziemniaki	Chelif	270	137	+97
		Melrhir	302		+120
		Macta	273		+99
		Seybouse	293		+114
		Average / Średnia	266		+94
Morocco / Maroko		Sebou	170		+24
Tunisia / Tunezja		(unknown) / (nieznane)	240		+75
Egypt / Egipt		Nile	310		+126
Spain / Hiszpania		Douro	170		+24

Source: authors' elaboration based on Mekonnen and Hoekstra (2010a); WFI and WFN (2020).

Źródło: opracowanie autorów na podstawie: Mekonnen i Hoekstra (2010a); WFI i WFN, 2020).

The results show that Algeria's average blue and green water footprint for wheat exceeds the global benchmark by 238%, while that of potatoes is 94% higher. Even when compared to countries with similar agro-climatic conditions, such as Morocco, Tunisia, and Spain, Algeria's values remain markedly elevated. This indicates that producing the same quantity of crops in Algeria requires substantially more water, highlighting low water productivity and inefficiencies in irrigation and crop management.

Furthermore, the water footprint varies considerably across Algeria's basins. For example, the Melhrir and Macta regions exhibit the highest footprints, reflecting regional disparities in rainfall, soil moisture retention, and irrigation efficiency. Such spatial variation underscores the need for targeted interventions tailored to basin-specific conditions rather than uniform national policies.

Reducing Algeria's excessive water footprint will require adopting improved irrigation technologies, soil and nutrient management practices, and the development of a crop zoning map based on climatic and hydrological suitability. Strategically allocating high-water-demand crops to areas with greater rainfall and lower irrigation dependency can significantly reduce overall water use and contribute to a sustainable, productivity-driven agricultural model.

Discussion and Policy Implications

The results presented in the previous section paint a clear and worrying picture. Algeria is facing a deepening water crisis (Table 2), and its agricultural sector, the largest water user (Table 4), is characterized by profound inefficiency, as evidenced by its low water productivity (Table 5) and high water footprint (Table 6). This section will interpret these findings, discuss their implications for food security, and explore the underlying causes of this underperformance.

Interpreting the Productivity Gap

The substantial gap between Algeria's Biophysical Water Productivity and global averages (Table 5) reflects a systemic inefficiency in the agricultural water use framework, deeply intertwined with structural, climatic, and technological constraints. This gap demonstrates that a significant portion of irrigation water is not effectively transformed into

Wyniki wskazują, że średni ślad dla wody niebieskiej i zielonej w Algierii w przypadku pszenicy przekracza globalną wartość odniesienia o 238%, podczas gdy w przypadku ziemniaków jest o 94% wyższy. Nawet w porównaniu z krajami o podobnych warunkach agroklimatycznych, takimi jak Maroko, Tunezja i Hiszpania, wartości notowane w Algierii są znacznie podwyższone. Wskazuje to, że produkcja tej samej ilości upraw w Algierii wymaga znacznie większej ilości wody, co podkreśla niską produktywność wody i nieefektywność nawadniania i zarządzania uprawami.

Co więcej, ślad wodny różni się znacznie w poszczególnych dorzeczach Algierii. Na przykład najwyższe ślady notuje się dla regionów Melhrir i Macta, co odzwierciedla regionalne różnice w opadach deszczu, retencji wilgoci w glebie i wydajności nawadniania. Takie zróżnicowanie przestrzenne stwarza potrzebę ukierunkowanych interwencji dostosowanych do warunków specyficznych dla danego dorzecza, a nie jednolitych polityk ogólnokrajowych.

Zmniejszenie nadmiernego śladu wodnego Algierii będzie wymagało przyjęcia ulepszonych technologii nawadniania, praktyk zarządzania glebą i składnikami odżywczymi oraz opracowania mapy stref upraw w oparciu o przydatność klimatyczną i hydrologiczną. Strategiczne przeniesienie upraw o wysokim zapotrzebowaniu na wodę na obszary o większych opadach deszczu i mniejszej zależności od nawadniania może znacznie zmniejszyć ogólne zużycie wody i przyczynić się do zrównoważonego, opartego na produktywności modelu rolnictwa.

Dyskusja i implikacje dla polityki

Wyniki przedstawione w poprzednim punkcie dają jasny i niepokojący obraz. Algieria stoi w obliczu pogłębiającego się kryzysu wodnego (tab. 2), a jej sektor rolniczy, zużywający najwięcej wody (tab. 4), jest wysoce nieefektywny, o czym świadczy jego niska produktywność wody (tab. 5) i wysoki ślad wodny (tab. 6). W tym punkcie przedstawiono interpretację tych wniosków, omówiono ich skutki dla bezpieczeństwa żywnościowego i zbadano przyczyny słabych wyników.

Interpretacja luki produktywności

Znaczna rozbieżność między biofizyczną produktywnością wody Algierii a średnimi światowymi (tab. 5) odzwierciedla systemową nieefektywność ogólnego wykorzystania wody w rolnictwie, głęboko powiązaną z ograniczeniami strukturalnymi, klimatycznymi i technologicznymi. Rozbieżność ta pokazuje, że znaczna część wody do nawadniania nie zostaje

food output, highlighting both the low efficiency of water use and the limited capacity of Algeria's agricultural system to convert water inputs into productive value. Recent analyses indicate that the country's dependence on traditional irrigation methods – particularly gravity-fed systems covering nearly half of irrigated land – results in high water losses ranging from 30% to 40% through evaporation and deep percolation (Algeria Press Service [APS], 2019; Langenberg et al., 2021). These losses are further aggravated by poor field-level management, limited access to agricultural inputs, and the absence of precision irrigation practices (Amirouche et al., 2020; Oulmane et al., 2019).

The consequences of this inefficiency extend beyond water waste. Studies have shown that inefficient irrigation systems accelerate groundwater depletion and increase the energy required for water pumping, thereby contributing to higher CO₂ emissions (Moursy et al., 2023). Switching from traditional surface irrigation to modern drip or sub-surface drip systems can markedly reduce energy use, mitigate environmental pressures, and raise irrigation efficiency from about 60% to over 90% (Drew & Crase, 2023; Hussain et al., 2023; Xue et al., 2024). In this context, Algeria's low BWP embodies a broader structural challenge shared by many arid Mediterranean regions, where water scarcity, climate variability, and frequent droughts undermine agricultural productivity (Bouchafaa & Djeddour-Djaballah, 2022; Hatami et al., 2025).

The high water footprint (Table 6) provides further evidence of these inefficiencies. Algeria's blue and green water footprints for key crops, particularly wheat and Potatoes, significantly exceed those of countries with similar agro-climatic conditions. This excessive footprint results from overreliance on traditional farming systems, low irrigation efficiency, and poor water-use optimization (Delpasand et al., 2021; Ribašauskienė et al., 2024; Singh et al., 2023). Inadequate pricing policies also play a crucial role: underpriced irrigation water reduces incentives for conservation and encourages over-irrigation (Langenberg et al., 2021; Van der Zaag & Savenije, 2006). These findings confirm that the productivity gap in Algeria is not merely technical – it is institutional and behavioral, stemming from the absence of economic signals that reflect water scarcity.

Addressing this challenge requires a dual approach that combines technological modernization and economic policy reform. On the technological side, adopting advanced irrigation methods such as drip and IoT-based smart irrigation systems has proven effective in enhancing water use efficiency

skutecznie spożytkowana do produkcji żywności, co podkreśla zarówno niską wydajność zużycia wody, jak i ograniczoną zdolność algierskiego systemu rolniczego do przekształcania zasobów wody w wartość produkcyjną. Ostatnie analizy wskazują, że zależność kraju od tradycyjnych metod nawadniania – w szczególności systemów grawitacyjnych obejmujących prawie połowę nawadnianych gruntów – prowadzi do wysokich strat wody, wynoszących od 30 do 40%, w wyniku parowania i głębokiego przesiąkania (APS, 2019; Langenberg i in., 2021). Na straty te dodatkowo wpływa słabe zarządzanie na poziomie pól uprawnych, ograniczony dostęp do środków produkcji rolnej i brak precyzyjnych praktyk nawadniania (Amirouche i in., 2020; Oulmane i in., 2019).

Konsekwencje tej nieefektywności wykraczają poza marnotrawstwo wody. Badania wykazały, że nieefektywne systemy nawadniania przyspieszają wyczerpywanie się wód gruntowych i zwiększają zapotrzebowanie na energię potrzebną do pompowania wody, przyczyniając się tym samym do wyższych emisji CO₂ (Moursy i in., 2023). Przejście z tradycyjnego nawadniania powierzchniowego na nowoczesne systemy nawadniania kropelkowego lub podziemnego kropelkowego może znacznie zmniejszyć zużycie energii, złagodzić presję na środowisko i zwiększyć wydajność nawadniania z około 60% do ponad 90% (Drew i Crase, 2023; Hussain i in., 2023; Xue i in., 2024). W tym kontekście niski poziom BWP w Algierii uosabia szersze wyzwanie strukturalne wspólne dla wielu suchych regionów śródziemnomorskich, gdzie niedobór wody, zmienność klimatu i częste susze negatywnie wpływają na wydajność rolnictwa (Bouchafaa i Djeddour-Djaballah, 2022; Hatami i in., 2025).

Wysoki ślad wodny (tab. 6) to kolejny dowód nieefektywności. Ślady dla wody niebieskiej i zielonej w Algierii w przypadku kluczowych upraw, w szczególności pszenicy i ziemniaków, znacznie przekraczają ślady notowane w krajach o podobnych warunkach agroklimatycznych. Tak duży ślad wynika z nadmiernego polegania na tradycyjnych systemach rolniczych, niskiej wydajności nawadniania i słabej optymalizacji zużycia wody (Delpasand i in., 2021; Ribašauskienė i in., 2024; Singh i in., 2023). Kluczową rolę odgrywa tu też nieodpowiednia polityka cenowa: zaniżone ceny wody do nawadniania zniechęcają do oszczędzania i skłaniają rolników do nadmiernego nawadniania pól (Langenberg i in., 2021; Van der Zaag i Savenije, 2006). Ustalenia te potwierdzają, że różnica w produktywności w Algierii ma nie tylko charakter techniczny – jest ona instytucjonalna i behawioralna, a także wynika z braku sygnałów ekonomicznych odzwierciedlających niedobór wody.

(Canet-Martí et al., 2023; Shahab et al., 2024). Empirical evidence from Morocco and China shows that drip irrigation can double yields while reducing water consumption by up to 50% compared to surface irrigation (Aabad et al., 2017; Xue et al., 2024; Yang et al., 2023). On the policy side, rational water pricing and demand-oriented management are essential to convey the real economic value of water and to shift agricultural behavior towards sustainability (Perry, 2018; Singh et al., 2023).

Implications for Food Security and Future Demand

The implications of this low productivity for food security are severe. It means that Algeria's domestic agricultural sector is struggling to meet national demand (Table 4), forcing a heavy reliance on food imports. This dependency on "virtual water" exposes the country to the volatility of international commodity markets and geopolitical risks.

As indicated by the projections summarized in Table 3 total national water demand may approach 20 billion m³ by 2050, while renewable resources remain structurally limited. This reinforces the urgency of demand-side efficiency measures and strategic gains in agricultural water productivity.

Underlying Causes and Pathways to Improvement

The root causes of Algeria's low water productivity are multifaceted:

- **Technological Deficit:** As discussed, the slow adoption of modern irrigation technologies like drip and sprinkler systems is a primary cause of water loss. Precision-agriculture and smart irrigation tools can directly target this deficit by improving scheduling and reducing non-beneficial losses. Examples include (i) irrigation scheduling based on reference evapotranspiration (ET₀) and crop coefficients; (ii) soil-moisture sensors and automated valves for real-time control;

Sprostanie temu wyzwaniu wymaga wdrożenia podwójnego podejścia łączącego modernizację technologiczną z reformą polityki gospodarczej. Od strony technologicznej przyjęcie zaawansowanych metod nawadniania, takich jak nawadnianie kropelkowe i inteligentne systemy nawadniania oparte na IoT, okazało się skuteczne w zwiększaniu efektywności zużycia wody (Canet-Martí i in., 2023; Shahab i in., 2024). Badania przeprowadzone w Maroku i Chinach wskazują, że nawadnianie kropelkowe może podwoić plony i zmniejszyć zużycie wody o 50% w porównaniu z nawadnianiem powierzchniowym (Aabad i in., 2017; Xue i in., 2024; Yang i in., 2023). W wymiarze polityki, rozsądne ceny wody i zarządzanie zorientowane na popyt to czynniki niezbędne do wykazania rzeczywistej wartości ekonomicznej wody i skłonienia sektora rolnego do podjęcia działań na rzecz zrównoważonego rozwoju (Perry, 2018; Singh i in., 2023).

Skutki dla bezpieczeństwa żywnościowego i przyszłego popytu

Konsekwencje niskiej produktywności dla bezpieczeństwa żywnościowego są poważne. Krajowy sektor rolny Algierii ma trudności z zaspokojeniem krajowego popytu (tab. 4), co wymaga wysokiego uzależnienia od importu żywności. Zależność od „wirtualnej wody” naraża kraj na niestabilność na międzynarodowych rynkach towarowych i na ryzyko geopolityczne.

Jak wskazują prognozy zestawione w tabeli 3, do 2050 r. całkowite krajowe zapotrzebowanie na wodę może zbliżyć się do 20 mld m³, podczas gdy zasoby odnawialne pozostaną ograniczone w wymiarze strukturalnym. Wskazuje to na pilną potrzebę zastosowania środków efektywności po stronie popytu i strategicznych korzyści w zakresie produktywności wody w rolnictwie.

Podstawowe przyczyny i ścieżki poprawy

Przyczyny niskiej produktywności wody w Algierii są wielopłaszczyznowe:

- **Deficyt technologiczny:** Jak już wspomniano, główną przyczyną strat wody jest powolne wdrażanie nowoczesnych technologii nawadniania, takich jak systemy nawadniania kropelkowego i systemy tryskaczowe. Precyzyjne rolnictwo i inteligentne narzędzia do nawadniania mogą być bezpośrednio wykorzystane w celu zlikwidowania tego deficytu, co poprawiłoby planowanie i zmniejszyło niekorzystne straty. Przykłady obejmują: (i) planowanie nawadniania w oparciu

(iii) remote sensing to monitor vegetation stress and uniformity at scale, and (iv) decision-support systems that combine weather forecasts, field data, and adaptive rules (including AI-enabled advisory platforms). In the Algerian context, scaling these approaches requires investment incentives, strengthened extension services, and capacity building for farmers and irrigation managers.

- **Agronomic Factors:** The problem is compounded by a low-input agricultural model. Without adequate use of fertilizers, quality seeds, and pest control, crop yields are inherently limited, which in turn suppresses water productivity.
- **Knowledge and Policy Gaps:** There is often a disconnect between policy, research, and farm-level practice. Insufficient agricultural extension services and training programs mean that many farmers lack the knowledge to implement water-saving techniques effectively.

The pathway to improvement must therefore be equally multifaceted. It requires a holistic strategy that combines technological modernization (incentivizing the shift to efficient irrigation), agronomic improvement (promoting a package of best practices for crop management), and human capital development (investing in farmer education and extension services).

Conclusions

This study therefore aims to critically assess the current state of agricultural water productivity in Algeria, exploring its potential as a key instrument of demand management to enhance national food security under intensifying climate stress. The analysis, based on a systematic synthesis of quantitative evidence, highlights the critical pressure on Algeria's water resources and the persistence of significant inefficiencies in agricultural water use, reflected in product-level performance gaps, water-footprint pressures, and a growing dependence on imported virtual water to meet strategic food demand. The nation is depleting its finite water resources to achieve levels of food production that remain below global benchmarks. The combination of rapidly declining per capita water availability and a projected increase

o referencyjną ewapotranspirację (ET₀) i współczynniki upraw; (ii) czujniki wilgotności gleby i zautomatyzowane zawory zapewniające kontrolę w czasie rzeczywistym; (iii) teledetekcję umożliwiającą monitorowanie stanu roślinności i jej jednorodności na dużą skalę; (iv) systemy wspomagania decyzji, które łączą prognozy pogody, dane terenowe i zasady adaptacyjne (w tym platformy doradcze oparte na sztucznej inteligencji). W kontekście Algierii skalowanie tych podejść wymaga wprowadzenia zachęt inwestycyjnych, świadczenia lepszych usług doradczych oraz budowania potencjału dla rolników i osób odpowiedzialnych za nawadnianie.

- **Czynniki agronomiczne:** Problem jest potęgowany przez niskonakładowy model rolnictwa. Bez odpowiedniego stosowania nawozów, wysokiej jakości nasion i walki ze szkodnikami, wielkość plonów jest z natury ograniczona, co z kolei zmniejsza produktywność wody.
- **Braki w wiedzy i polityce:** Często występuje rozdział między polityką, badaniami i praktyką na poziomie gospodarstwa. Nieadekwatne usługi doradztwa rolniczego i programy szkoleniowe sprawiają, że wielu rolników nie posiada wiedzy niezbędnej do skutecznego wdrażania technik oszczędzania wody.

Droga do poprawy musi być zatem równie wieloaspektowa. Wymaga ona zastosowania kompleksowej strategii łączącej modernizację technologiczną (zachęcanie do przejścia na wydajne nawadnianie), poprawę agronomiczną (promowanie pakietu najlepszych praktyk w zakresie zarządzania uprawami) oraz rozwój kapitału ludzkiego (inwestowanie w edukację rolników i usługi doradcze).

Wnioski

Niniejsze badanie ma zatem na celu dokonanie krytycznej oceny bieżącego stanu produktywności wody w algierskim rolnictwie i zbadanie jej potencjału jako kluczowego instrumentu zarządzania popytem na potrzeby zwiększenia krajowego bezpieczeństwa żywnościowego w warunkach nasilającej się presji klimatycznej. Analiza, oparta na systematycznej syntezie dowodów ilościowych, podkreśla krytyczną presję na zasoby wodne Algierii i znaczne nieefektywności w zakresie wykorzystania wody w rolnictwie, co znajduje odzwierciedlenie w braku wydajności na poziomie produktu, presji na ślad wodny i rosnącej zależności od importowanej wirtualnej wody w celu zaspokojenia strategicznego popytu na żywność. Naród wyczerpuje swoje ograniczone zasoby wody, aby osiągnąć poziom produkcji żywności,

in future demand creates an unsustainable trajectory that threatens the country's long-term food security.

The findings lead to an inescapable conclusion: a radical shift in strategy is necessary. Algeria must pivot from a supply-oriented water policy to a demand-management paradigm centered on aggressively enhancing agricultural water productivity. The significant gap in biophysical water productivity and the high water footprint are not just problems; they represent the scale of the opportunity. Closing this gap through a concerted national program of irrigation modernization, improved agronomic practices, and robust policy support is the most viable, and perhaps only, path to ensuring a sustainable and food-secure future. Investing in "more crop per drop" is a direct investment in national resilience.

który utrzymuje się poniżej światowych standardów. Gwałtownie malejące zasoby wody na mieszkańca w połączeniu z prognozowanym wzrostem przyszłego zapotrzebowania prowadzą kraj ku sytuacji nie do utrzymania w dłuższej perspektywie, zagrażając bezpieczeństwu żywnościowemu państwa.

Stwierdzenia te prowadzą do nieuniknionego wniosku: konieczna jest radykalna zmiana strategii. Algieria musi przejść od polityki wodnej zorientowanej na podaż do paradygmatu zarządzania popytem, skupionego na zdecydowanej poprawie produktywności wodnej w rolnictwie. Znaczna luka w biofizycznej produktywności wody i wysoki ślad wodny to nie tylko problemy – to jednocześnie miara skali możliwości, jakie stoją przed państwem. Eliminacja tej luki w wyniku wdrożenia skoordynowanego krajowego programu modernizacji nawadniania, ulepszone praktyki agronomiczne i solidne wsparcie polityczne stanowią najbardziej realną i być może jedyną drogę ku zapewnieniu zrównoważonej i bezpiecznej żywnościowo przyszłości. Inwestowanie w zasadę „więcej plonów z każdej kropli wody” to bezpośrednia inwestycja w długoterminową stabilność kraju.

References / Bibliografia

- Aabad, M., Bouaziz, A., Falisse, A., Martiné, J.-F., & El-Messaoudi, M. (2017). Amélioration du rendement et de l'efficacité d'utilisation de l'eau de la canne à sucre sous irrigation au goutte à goutte dans la région de Gharb au Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 5(1), 32–40. https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAPH2/article/view/467
- Amirouche, M., Smadhi, D., Mouhouche, B. & Zella, L. (2020). Analysis and Diagnosis of the Management of Irrigation Systems in the Mitidja West Irrigated Perimeter. *Acta Scientific Agriculture*, 4(2), 45–49. <https://actascientific.com/ASAG/ASAG-04-0774.php>
- Annan, K.A. (2000). *"We the Peoples": The Role of the United Nations in the 21st Century*. United Nations. <https://digitalibrary.un.org/record/413745>
- Arab Organization for Agricultural Development (AOAD). (2019). *Arab Agricultural Statistics Yearbook 2019* (Vol. 39). <https://aoad.org/ASSY39/statbook39Cont.htm>
- Arab Organization for Agricultural Development (AOAD). (2023). *Arab Agricultural Statistics Yearbook 2023* (Vol. 43). <https://aoad.org/ASSY43/statbook43Cont.htm>
- Algeria Press Service (APS). (2019, January 31). *Water Resources: The Need for Algeria to Adopt a Scheme for the Economy of Irrigation Water*.
- Bensmaine, L. (2022, November 5). *Climate Change in Algeria and its Impacts*. Assafir Al-Arabi. <https://assafirarabi.com/en/48562/2022/11/05/climate-change-in-algeria-and-its-impacts/>
- Benblida, M., & Thivet, G. (2010). *Gestion des ressources en eau: Les limites d'une politique de l'offre*. Les Notes d'analyse du CIHEAM, 58. Centre International de Hautes Études Agronomiques Méditerranéennes (CIHEAM). http://portail2.reseau-concept.net/Upload/ciheam/fichiers/NAN58_Thivet.pdf
- Bessaoud, O., Pellissier, J.-P., Rolland, J.-P., & Khechimi, W. (2019). *Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie*. Centre International de Hautes Études Agronomiques Méditerranéennes (CIHEAM). http://www.iamm.ciheam.org/ress_doc/opac_css/doc_num.php?explnum_id=18246
- Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the Projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water*, 2, 15. <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
- Borowski, P.F. (2020). Nexus Between Water, Energy, Food and Climate Change as Challenges Facing the Modern Global, European and Polish economy. *AIMS Geosciences*, 6(4), 397–421. <https://doi.org/10.3934/geosci.2020022>
- Bouchafaa, A., & Djeddour-Djaballah, K. (2022). Analysis of Cereal Production in Algeria. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 22(5), 20349–20365. <https://doi.org/10.18697/ajfand.110.19195>
- Canet-Martí, A., Morales-Santos, A., Nolz, R., Langergraber, G., & Stumpp, C. (2023). Quantification of Water Fluxes and Soil Water Balance in Agricultural Fields Under Different Tillage and Irrigation Systems Using Water Stable Isotopes. *Soil and Tillage Research*, 231, 105732. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105732>
- Chabaca, M.N., Tarik, H., Madjid, D., & Amar, I. (2014). A Multicriteria Approach for Evaluating the Performances of Irrigated Perimeters in the Southern Mediterranean Countries: Case of the Mitidja Plain (Algeria). *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(7), 800–807. <https://www.ijert.org/a-multicriteria-approach-for-evaluating-the-performances-of-irrigated-perimeters-in-the-southern-mediterranean-countries-case-of-the-mitidja-plain-algeria>
- Clima-Med. (n.d.). *Democratic Republic of Algeria: Policy Fiche: Managing the Impact of Climate Change on Agriculture*. <https://www.climamed.eu/wp-content/uploads/files/Agriculture-CC-Algeria.pdf>
- Cosgrove, W., & Rijsberman, F. (2000). *World Water Vision: Making Water Everybody's Business*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315071763>
- Delpasand, M., Bozorg-Haddad, O., & Goharian, E. (2021). Water Footprint. In: O. Bozorg-Haddad (Ed.), *Water Resources: Future Perspectives, Challenges, Concepts and Necessities* (pp. 151–174). IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781789062144_0151
- Drew, M., & Crase, L. (2023). "More Crop per Drop" and Water Use Efficiency in the National Water Policy of Pakistan. *Agricultural Water Management*, 288, 108491. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108491>
- Drouiche, N., Ghaffour, N., Naceur, M. W., Lounici, H., & Drouiche, M. (2012). Towards Sustainable Water Management in Algeria. *Desalination and Water Treatment*, 50(1–3), 272–284. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.719477>
- Durán-Sánchez, A., Álvarez-García, J., & Río-Rama del, M. (2018). Sustainable Water Resources Management: A Bibliometric Overview. *Water*, 10(9), 1191. <https://doi.org/10.3390/w10091191>
- Falkenmark, M., Lundqvist, J., & Widstrand, C. (1989). Macro-Scale Water Scarcity Requires Micro-Scale Approaches. *Natural Resources Forum*, 13(4), 258–267. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1989.tb00348.x>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015a). *Climate Change and Food Security: Risks and Responses*. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i5188e>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015b). *Profil de Pays – Algérie*. AQUASTAT Report. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i9861fr>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2025a). AQUASTAT Dissemination System. <https://www.fao.org/aquastat/en/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2025b). FAOSTAT: Food Balances (2010–): Crops and Livestock Products. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations: A New Environmental Record for Monitoring Extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gerbens-Leenes, P.W., Mekonnen, M.M., & Hoekstra, A.Y. (2013). The Water Footprint of Poultry, Pork and Beef: A Comparative Study in Different Countries and Production Systems. *Water Resources and Industry*, 1–2, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2013.03.001>
- Gleick, P.H., Wolff, G., Chalecki, E.L., & Reyes, R. (2002). *The New Economy of Water: The Risks and Benefits of Globalization and Privatization of Fresh Water*. Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security. <https://pacinst.org/publication/new-economy-of-water/>
- Hatami, A., Farokhzadeh, B., & Bazrafshan, O. (2025). Water Footprint and Stress Index Assessment in Mediterranean Agriculture. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197, 301. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13687-2>
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., & Mekonnen, M.M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Routledge.
- Hussain, F., Maeng, S.-J., Cheema, M.J.M., Anjum, M.N., Afzal, A., Azam, M., Wu, R.-S., Noor, R.S., Umair, M., & Iqbal, T. (2023). Solar Irrigation Potential, Key Issues and Challenges in Pakistan. *Water*, 15(9), 1727. <https://doi.org/10.3390/w15091727>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Kherbache, N. (2020). Water Policy in Algeria: Limits of Supply Model and Perspectives of Water Demand Management (WDM). *Desalination and Water Treatment*, 180, 141–155. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25009>
- Kijne, J., Barron, J., Hoff, H., Rockstrom, J., Karlberg, L., Gowing, J., Wani, S.P., & Wichelns, D. (2009). *Opportunities to increase water productivity in agriculture with special reference to Africa and South Asia*. Stockholm Environment Institute. <https://www.sei.org/publications/opportunities-increase-water-productivity-agriculture-special-reference-africa-south-asia/>
- Kılıç, Z. (2020). The Importance of Water and Conscious Use of Water. *International Journal of Hydrology*, 4(5), 239–241. <https://doi.org/10.15406/ijh.2020.04.00250>
- Kostopoulou, E., & Jones, P.D. (2005). Assessment of Climate Extremes in the Eastern Mediterranean. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 89(1–4), 69–85. <https://doi.org/10.1007/s00703-005-0122-2>
- Kumar, K., Ramanjaneyulu, A., Ramulu, V., & Praveen Rao, V. (2017). Micro Irrigation for Food Security and Improving Water Productivity. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Bio-resource and Stress Management* (pp. 48–57). Society for Bio-resource and Stress Management. https://www.researchgate.net/publication/323085127_Micro_Irrigation_for_Food_Security_and_Improving_Water_Productivity
- Langenberg, V., Bruning, B., Vos de, A., Heijden van der, A., & La Loma Gonzalez de, B. (2021, March 1). *Water in Agriculture in Three Maghreb Countries. Status of Water Resources and Opportunities in Algeria, Morocco and Tunisia. Final Report*. Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality of the Netherlands. <https://prod5.assets-cdn.io/event/6099/assets/8383926062-5847dd91d1.pdf>
- Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables (MEER). (2019). *Plan National Climat*. <https://www.me.gov.dz/telechargement/plan-national-climat/#>
- Mekonnen, M.M., & Hoekstra, A.Y. (2010a). *The Green, Blue and Grey Water Footprint of Crops and Derived Crop Products*. Value of Water Research Report, 47. UNESCO-IHE Institute for Water Education. <https://research.utwente.nl/en/publications/the-green-blue-and-grey-water-footprint-of-crops-and-derived-crop-3/>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010b). *The Green, Blue and Grey Water Footprint of Farm Animals and Animal Products*. Value of Water Research Report, 48. UNESCO-IHE Institute for Water Education. <https://research.utwente.nl/en/publications/the-green-blue-and-grey-water-footprint-of-animals-and-animal-pro/>

- Molden, D., Sakthivadivel, R., & Habib, Z. (2001). *Basin-Level Use and Productivity of Water: Examples from South Asia*. IWMI Research Report, 49. International Water Management Institute. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.61099>
- Moursy, M.A.M., El-Fetyany, M., Meleha, A.M.I., & El-Bialy, M.A. (2023). Productivity and Profitability of Modern Irrigation Methods Through the Application of On-Farm Drip Irrigation on Some Crops in the Northern Nile Delta of Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 62, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.06.063>
- Olmstead, S.M. (2010). The Economics of Managing Scarce Water Resources. *Review of Environmental Economics and Policy*, 4(2), 179–198. <https://doi.org/10.1093/reep/req004>
- Oulmane, A., Ali, C., & Frija, A. (2019). The Water Use Efficiency and Its Determinants in Small Horticultural Farms in Algeria. *SN Applied Sciences*, 1, 1236. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1238-1>
- Oulmane, A., Kechar, A., Benmihoub, A., & Amine Benmehaia, M. (2022). Assessment of Surface Water Management Institutions: A Case of Public Irrigation Schemes in Northern Algeria. *Water Policy*, 24(2), 229–241. <https://doi.org/10.2166/wp.2022.025>
- Perry, C. (2018, May 22). *Improving Irrigation Management in Conditions of Scarcity: Myth vs Truth*. Global Water Forum. <https://www.globalwaterforum.org/2018/05/22/improving-irrigation-management-in-conditions-of-scarcity-myth-vs-truth/>
- Perry, C., & Steduto, P. (2017). *Does Improved Irrigation Technology Save Water? A Review of the Evidence*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35540.81280>
- Population Reference Bureau (PRB). (2015). *World Population Data Sheet 2015*. https://www.prb.org/wp-content/uploads/2021/04/2015-world-population-data-sheet_eng.pdf
- Ragab, R. (2011). *Water Saving in Agriculture: Management Approaches and Practical Tools*. [Paper presentation]. Green Week, May 24–27, 2011, Brussels, Belgium. https://wayback.archive-it.org/12090/20201014112458/https://ec.europa.eu/environment/archives/greenweek2011/sites/default/files/3-3_Ragab.pdf
- Ribašauskienė, E., Eičaitė, O., Baležentis, T., & Agnusdei, G.P. (2024). Decomposition of the Water Footprint of Food Loss and Waste: The Case of Lithuanian Supply Chains. *Ecological Indicators*, 166, 112255. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112255>
- Rijsberman, F.R. (2002). Water for Food and Environment: The Need for Dialogue. *Agriculture & Rural Development*, 9(2), 30–33. <https://hdl.handle.net/10568/40145>
- Rijsberman, F.R. (2006). Water Scarcity: Fact or Fiction? *Agricultural Water Management*, 80(1–3), 5–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.001>
- Scheierling, S., Treguer, D.O., & Booker, J.F. (2016). Water Productivity in Agriculture: Looking for Water in the Agricultural Productivity and Efficiency Literature. *Water Economics and Policy*, 2(3), 1650007. <https://doi.org/10.1142/S2382624X16500077>
- Schilling, J., Hertig, E., Trambly, Y., & Scheffran, J. (2020). Climate Change Vulnerability, Water Resources and Social Implications in North Africa. *Regional Environmental Change*, 20(1), 15. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01597-7>
- Shahab, H., Iqbal, M., Sohaib, A., Ullah Khan, F., & Waqas, M. (2024). IoT-Based Agriculture Management Techniques for Sustainable Farming: A Comprehensive Review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 220, 108851. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108851>
- Siebert, S., Henrich, V., Frenken, K., & Burke, J. (2013). *Update of the Digital Global Map of Irrigation Areas to Version 5*. Food and Agriculture Organization, University of Bonn. <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/02e5f498-eb5d-4a08-b501-b3e05fdefc57/download>
- Simonovic, S.P., & Breach, P.A. (2020). The Role of Water Supply Development in the Earth System. *Water*, 12(12), 3349. <https://doi.org/10.3390/w12123349>
- Singh, D.K., Shivam, Singh, V.K., Singh, V.K., Kumar, M., & Mishra, P.K. (2023). Agricultural Water Footprint Studies for Sustainable Agricultural Water Management: A Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(9), 238–250. <https://doi.org/10.9734/ijecce/2023/v13i92259>
- Talbi, D., & Alani, A. (2022). *Creating a Sustainable Future in Algeria Water Resource Management*. The 5th BUID Doctoral Research Conference 2020. <https://easychair.org/publications/preprint/3p6D/open>
- Tazekrit, I., Benslimane, M., Hamimed, A., Hartani, T., & Khaldi, A. (2017). Concerted Water Management of Large Irrigated Perimeters. Case of the Habra Plain (North-West Algeria). *Larhyss Journal*, 30, 121–136. <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/505>
- United Nations Development Programme (UNDP). (2006). *Human Development Report 2006: Beyond Scarcity: Power, Poverty and the Global Water Crisis*. <https://hdr.undp.org/system/files/documents/human-development-report-2006-english.human-development-report-2006-english>
- United Nations Development Programme (UNDP). (2008). *Human Development Report 2007/8: Fighting Climate Change: Human Solidarity in a Divided World*. <https://hdr.undp.org/content/human-development-report-20078>

- United Nations Development Programme (UNDP). (2009). *Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie*.
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2020). *Reconciling Resource Uses: Assessment of the Water–Food–Energy–Ecosystems Nexus in the North Western Sahara Aquifer System: Part A – “Nexus challenges and solutions”*. https://unece.org/DAM/env/water/publications/WAT_NONE_16_NWSAS_Nexus/NWSAS-UNECE_EN_Web.pdf
- UNESCO World Water Assessment Programme. (2021). *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724>
- UNESCO World Water Assessment Programme. (2022). *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the Invisible Visible*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721>
- Vinca, A., Riahi, K., Rowe, A., & Djilali, N. (2021). Climate–Land–Energy–Water Nexus Models Across Scales: Progress, Gaps and Best Accessibility Practices. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 691523. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.691523>
- Water Footprint Implementation, & Water Footprint Network (WFI, & WFN). (2020). Water Footprint Assessment Tool. <https://www.waterfootprintassessmenttool.org/countries/~EGY~FRA~ITA~MAR~TUN~ESP~DZA/sustainability/table/blue/15>
- World Bank. (2025). World Development Indicators. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>
- World Meteorological Organization (WMO). (2022, September 8). *State of Climate in Africa Highlights Water Stress and Hazards*. <https://wmo.int/news/media-centre/state-of-climate-africa-highlights-water-stress-and-hazards>
- World Water Assessment Programme. (2003). *Water for People, Water for Life: The United Nations world Water Development Report*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000129556>
- Wu, Z., Xiao, H., Lu, G., & Chen, J. (2015). Assessment of Climate Change Effects on Water Resources in the Yellow River Basin, China. *Advances in Meteorology*, 816532. <https://doi.org/10.1155/2015/816532>
- Wutich, A., White, A.C., White, D.D., Larson, K.L., Brewis, A., & Roberts, C. (2014). Hard Paths, Soft Paths or No Paths? Cross-Cultural Perceptions of Water Solutions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), 109–120. <https://doi.org/10.5194/hess-18-109-2014>
- Xue, J., Sun, S., Luo, L., Gao, Z., Yin, Y., Zhao, J., Li, C., Wang, Y., & Wu, P. (2024). Quantification of Wheat Water Footprint Based on Data Assimilation of Remote Sensing and WOFOST Model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 347, 109914. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109914>
- Yang, P., Wu, L., Cheng, M., Fan, J., Li, S., Wang, H., & Qian, L. (2023). Review on Drip Irrigation: Impact on Crop Yield, Quality, and Water Productivity in China. *Water*, 15(9), 1733. <https://doi.org/10.3390/w15091733>
- Van der Zaag, P., & Savenije, H.H.G. (2006). *Water as an Economic Good: The Value of Pricing and the Failure of Markets*. Value of Water Research Report Series, 19. UNESCO-IHE Institute for Water Education. https://www.researchgate.net/publication/228999273_Water_as_an_economic_good_the_value_of_pricing_and_the_failure_of_markets

Submission date / Data nadesłania: 17.11.2025.

Final revision date / Data ostatniej recenzji: 16.01.2026.

Acceptance date / Data akceptacji: 23.04.2026.

© 2026 Toudjani, Z., Maougal, N., & Mehieddine, S. This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Autorskie prawa osobiste: Toudjani, Z., Maougal, N. i Mehieddine, S. (2026). Niniejszy artykuł został opublikowany w otwartym dostępie na licencji Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

