INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

2026, Vol. 21(1), 61–73
e-ISSN: 2956-7971, License CC-BY 4.0

DOI: https://doi.org/10.14597/infraeco.2026.005

ŹRÓDŁA PRESJI ŚRODOWISKOWEJ WYNIKAJĄCEJ Z WYBORÓW ŻYWIENIOWYCH – PORÓWNAWCZA ANALIZA ŚLADU WODNEGO I ŚLADU WĘGLOWEGO

ENVIRONMENTAL PRESSURE ASSOCIATED WITH DIETARY CHOICES – A COMPARATIVE ANALYSIS OF WATER AND CARBON FOOTPRINTS

Agnieszka KARCZMARCZYK [1]

STRESZCZENIE

Ocena środowiskowego wpływu diet najczęściej opiera się na analizie średnich wartości śladu wodnego i śladu węglowego, podczas gdy znacznie rzadziej uwzględnia zmienność wzorców żywieniowych oraz identyfikację czynników odpowiedzialnych za powstawanie presji środowiskowej. Ponadto ślad wodny i ślad węglowy są często traktowane jako równoważne wskaźniki oddziaływania środowiskowego, pomimo że odzwierciedlają odmienne mechanizmy związane z produkcją i konsumpcją żywności. Celem badań była identyfikacja głównych źródeł presji środowiskowej wynikającej z indywidualnych wyborów żywieniowych poprzez porównawczą analizę śladu wodnego i śladu węglowego diet studentów oraz ocenę ich tygodniowej zmienności. Badanie przeprowadzono na podstawie siedmiodniowych dzienniczków żywieniowych. Dla każdego respondenta obliczono średni dzienny ślad wodny i ślad węglowy oraz wskaźniki opisujące ich tygodniową zmienność i koncentrację: współczynnik zmienności (CV) oraz wskaźnik koncentracji (HHI). Zarówno dla śladu wodnego, jak i śladu węglowego wykazano, że średni poziom śladu środowiskowego był w dużej mierze niezależny od jego tygodniowej zmienności (CV) oraz koncentracji (HHI). Wskaźniki CV i HHI wykazywały silne dodatnie korelacje, co sugeruje, że opisują powiązane, lecz nie tożsame aspekty tygodniowego rozkładu presji środowiskowej. Modele regresji wykazały odmienne determinanty śladu wodnego i śladu węglowego, wskazując na większe znaczenie produktów importowanych dla śladu wodnego oraz produktów pochodzenia zwierzęcego dla śladu węglowego. Uzyskane wyniki wskazują, że ślad wodny i ślad węglowy nie są wskaźnikami zamiennymi, lecz opisują odmienne źródła presji środowiskowej wynikającej z wyborów żywieniowych. Jednoczesne uwzględnienie obu wskaźników oraz analizy tygodniowej zmienności pozwala na

[1] *Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Polska*

pełniejszą identyfikację czynników odpowiedzialnych za środowiskowe oddziaływanie diet i może stanowić wartościowe narzędzie wspierające projektowanie bardziej zrównoważonych wzorców żywieniowych.

Słowa kluczowe: *ślad wodny, ślad węglowy, wybory żywieniowe, dieta zrównoważona, produkty importowane, produkty pochodzenia zwierzęcego*

ABSTRACT

Environmental assessments of diets are most commonly based on average water and carbon footprint values, whereas considerably less attention has been paid to the variability of dietary patterns and the identification of the factors driving environmental pressure. Moreover, water and carbon footprints are often treated as interchangeable indicators of environmental impact, despite reflecting different mechanisms associated with food production and consumption. The aim of this study was to identify the main sources of environmental pressure arising from individual dietary choices through a comparative analysis of the water and carbon footprints of university students' diets and an assessment of their weekly variability. The study was based on seven-day food diaries. For each participant, the mean daily water and carbon footprints were calculated, along with two indicators of their weekly variability and concentration: the coefficient of variation (CV) and the Herfindahl–Hirschman Index (HHI). For both the water and carbon footprints, the average environmental footprint was found to be largely independent of its weekly variability (CV) and concentration (HHI). The CV and HHI showed strong positive correlations, suggesting that they describe related but distinct aspects of the weekly distribution of environmental pressure. Regression models identified different determinants of the two environmental indicators, demonstrating that imported food products contributed more strongly to the water footprint, whereas animal-based products were the primary determinants of the carbon footprint. These findings indicate that water and carbon footprints should not be considered interchangeable indicators, as they capture different sources of environmental pressure associated with dietary choices. Simultaneous consideration of both indicators, together with an assessment of weekly variability, provides a more comprehensive understanding of the factors shaping the environmental impacts of diets and may serve as a valuable tool for supporting the development of more sustainable dietary patterns.

Keywords: *water footprint, carbon footprint, dietary choices, sustainable diet, imported food products, animal-based products*

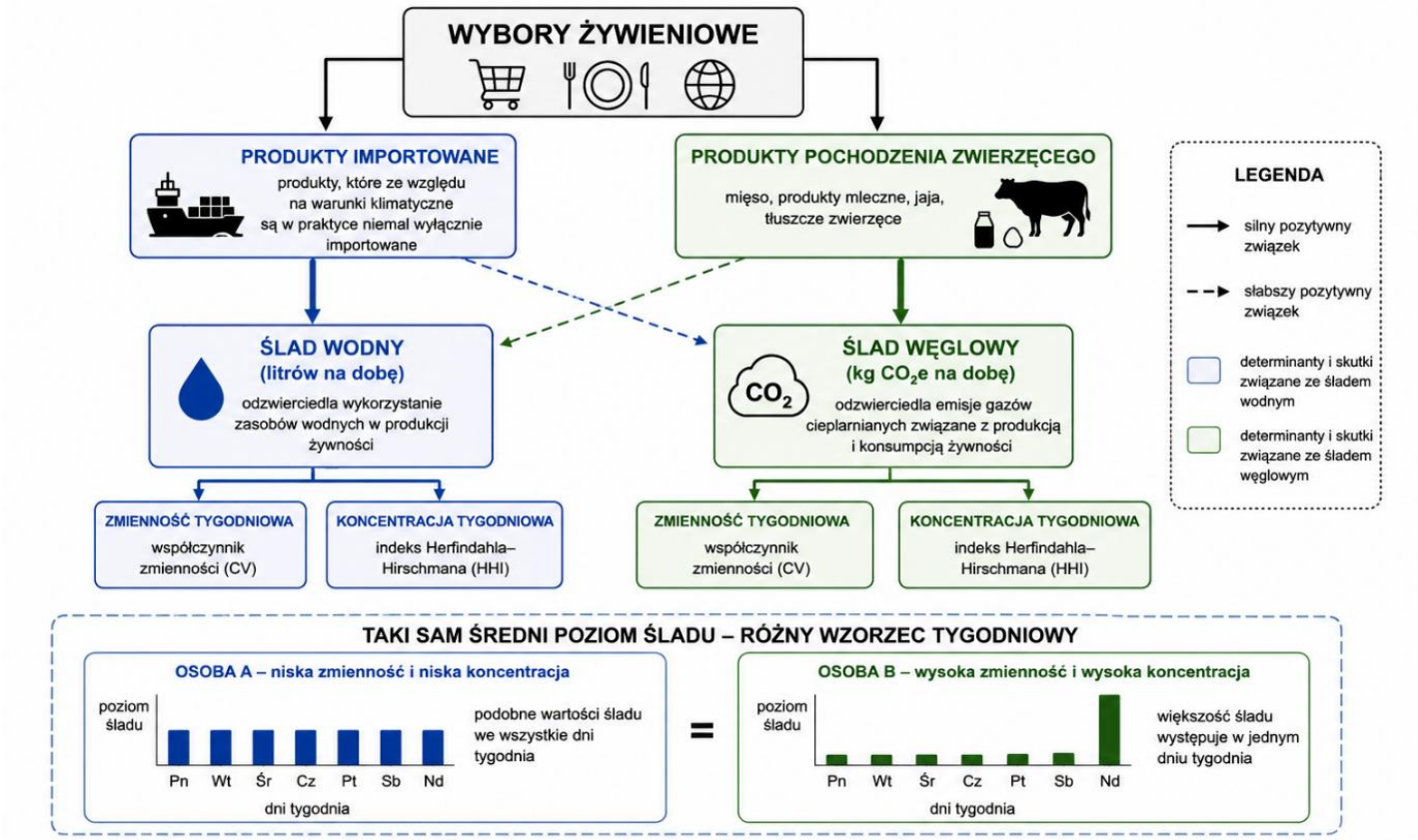
WPROWADZENIE

Analiza wpływu systemów żywnościowych na środowisko jest niezbędna, ponieważ sektor ten jest istotnym czynnikiem przekraczania granic planetarnych (Henriksson i in., 2021; Kenđel Jovanović i in., 2025; Willett i in., 2019). Produkcja żywności odpowiada za około 30% globalnych emisji gazów cieplarnianych (Poore i Nemecek, 2018, Hatjiathanassiadou i in., 2023; Clonan i in., 2016) oraz za ok. 70% całkowitego zużycia wody słodkiej na świecie (Kenđel Jovanović i in., 2025; Willett i in., 2019; Harris i in., 2020). Ponadto rolnictwo zajmuje blisko 40% powierzchni lądów wolnych od lodu i jest główną przyczyną utraty bioróżnorodności (Willett i in., 2019, Poore i Nemecek, 2018; Ludwig-Borycz i in., 2023).

Koncepcja zrównoważonej diety łączy zdrowie człowieka z kondycją planety (Willett i in., 2019; Tilman i Clark, 2014). Diety o wysokiej zawartości produktów zwierzęcych i żywności wysokoprzetworzonej nie tylko zwiększają ryzyko chorób, takich jak otyłość, cukrzyca i choroby serca, ale także generują nadmierną presję ekologiczną (Kenđel Jovanović i in., 2025; Willett i in., 2019, Tilman i Clark, 2014). Transformacja wzorców żywieniowych w kierunku diet opartych głównie na produktach roślinnych, takich jak Planetary Health Diet (PHD), jest uznawana za jeden z kluczowych elementów zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego przy jednoczesnym utrzymaniu funkcjonowania systemów środowiskowych w granicach planetarnych (Willett i in., 2019). Transformacja wzorców żywieniowych w kierunku diet opartych głównie na produktach roślinnych może jednocześnie przynosić korzyści zdrowotne i środowiskowe (Ludwig-Borycz i in., 2023).

Ślad wodny (WF) i ślad węglowy (CF) opisują odmienne rodzaje presji środowiskowej i nie zawsze są ze sobą skorelowane (Vanham i in., 2019). Zmniejszenie śladu węglowego poprzez przejście na dietę roślinną często wiąże się ze wzrostem zużycia wody, jeśli mięso jest zastępowane produktami wymagającymi intensywnego nawadniania (Harris i in., 2020). Diety uznawane za zdrowe (np. śródziemnomorska) mogą znacząco redukować zielony ślad wodny dzięki mniejszemu spożyciu mięsa, ale jednocześnie utrzymywać wysoki niebieski ślad wodny ze względu na duże zapotrzebowanie upraw roślinnych na wodę w regionach suchych (Kalmpourtzidou i in., 2025). Wysoka jakość żywieniowa diety nie zawsze przekłada się na niski ślad środowiskowy, ponieważ niektóre produkty o niskiej gęstości energetycznej mogą charakteryzować się wysokim śladem środowiskowym w przeliczeniu na jednostkę dostarczanej energii (Kenđel Jovanović i in., 2026; Tilman i Clark, 2014, Camporesi i Bordoni, 2025). Badania analizujące ślady środowiskowe diet opierają się najczęściej na śladzie węglowym (Hatjiathanassiadou i in., 2023), czasami wspieranym śladem wodnym (Henriksson i in., 2021), a wyniki wskazują na rozwój niezdrowych i wysokoemisyjnych wzorców żywieniowych (Kenđel Jovanović i in., 2025) oraz niską zgodność z dietami zrównoważonymi (Ludwig-Borycz i in., 2023).

Mimo znacznej liczby publikacji naukowych dotyczących śladów środowiskowych różnych wzorców żywieniowych, w literaturze wciąż występują luki badawcze. Należy tu wspomnieć o ograniczonej analizie tego, jak ślady środowiskowe podlegają zmianom w czasie, braku zintegrowanych analiz wielu czynników wpływających jednocześnie na wielkość śladów, ograniczonej liczbie danych z krajów o niskich dochodach, a także wpływie aspektów społeczno-kulturowych (Harris i in., 2020; Kalmpourtzidou i in., 2025; Machado i in., 2023). W niniejszej pracy podjęto próbę częściowego wypełnienia tej luki. Celem pracy była ocena wielkości oraz tygodniowej zmienności śladu wodnego i śladu węglowego indywidualnych diet studentów, a także identyfikacja głównych determinant obu wskaźników środowiskowych, ze szczególnym uwzględnieniem produktów importowanych oraz pochodzenia zwierzęcego. Schemat koncepcyjny przedstawiający zależności między wyborami żywieniowymi, śladem wodnym, śladem węglowym oraz ich tygodniową zmiennością przedstawiono na Rysunku 1.



Rysunek 1. Koncepcyjny model zależności między wyborami żywieniowymi a śladem wodnym i śladem węglowym oraz ich tygodniową zmiennością
Figure 1. Conceptual model of the relationships between dietary choices, water footprint, carbon footprint, and their weekly variability.
Źródło / Source: opracowanie własne z wykorzystaniem narzędzia ChatGPT (OpenAI) do wygenerowania koncepcji i projektu graficznego rysunku; ostateczna wersja została zweryfikowana i zaakceptowana przez Autora. / Author's own work. The conceptual design and graphical layout were generated with the assistance of ChatGPT (OpenAI), and the final version was reviewed and approved by the author

MATERIAŁ I METODY

W badaniu wzięło udział 64 studentów Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie: 44 z I roku kierunku Architektura Krajobrazu oraz 20 z III roku kierunku Ochrona Środowiska. Studenci notowali spożywane produkty oraz ich ilość przez 7 dni. Zgodnie z literaturą, dla większości składników odżywczych 3–4 dni (z co najmniej jednym dniem weekendowym) są wystarczające do uzyskania wiarygodnych średnich, a 7 dni zapewnia jeszcze większą stabilność oszacowania (Singh i in., 2025). Dobowe ślady środowiskowe (wodny i węglowy) były samodzielnie określane przez studentów na podstawie ilości spożytych produktów oraz danych źródłowych z otwartych i powszechnie dostępnych zasobów (Clark i in., 2022; Poore i Nemecek, 2018; https://www.waterfootprint.org/; https://ourworldindata.org/; https://www.co2everything.com/).

Studenci określali również średni ślad wodny i węglowy związany z produktami z zagranicy (IP) oraz produktami pochodzenia zwierzęcego (AP) występującymi w ich dietach. W związku z brakiem dokładnych danych

dotyczących pochodzenia produktów, za produkty z zagranicy uznawano wszystkie produkty, które nie mogą być produkowane w Polsce. Przykładem mogą być ryż, kawa, herbata, awokado, owoce cytrusowe. Jako produkty pochodzenia zwierzęcego przyjmowano wszystkie produkty mięsne, mleko i jego przetwory oraz jaja. Dane te zostały wykorzystane w celu identyfikacji determinant środowiskowego wpływu diet.

Studenci biorący udział w projekcie definiowali swój typ diety, wskazując dietę ogólną, wegetariańską lub dietę szczególną. Jednak analiza wskazanych typów diet wykazała, że 52 z 64 studentów wskazało dietę ogólną. Ponieważ liczebności grup są silnie niezrównoważone, w dalszej analizie zdecydowano się nie wyróżniać typu diety. Podobnie, wstępna analiza statystyczna nie wykazała istotnych różnic pomiędzy studentami I i III roku, dlatego do dalszej analizy przyjęto cały zbiór danych.

W przeglądach metod oceny sposobu żywienia podkreśla się, że jednym z głównych problemów jest zmienność spożycia pomiędzy dniami, dlatego stosuje się wielodniowe dzienniczki. Wykazano np., że w weekendy spożycie energii, węglowodanów, alkoholu jest wyraźnie większe niż w dni robocze (Singh i in. 2025). Jednak zmienność ta jest najczęściej traktowana jako źródło losowej zmienności, którą należy zminimalizować poprzez uśrednienie wyników, a nie jako cecha mogąca dostarczać dodatkowych informacji o wzorcach żywieniowych (Rupasinghe i in., 2020). W związku z tym w niniejszej pracy analizowano nie tylko średnią wielkość śladu środowiskowego, lecz również jego rozkład w czasie, aby określić, czy jest on efektem utrwalonych wzorców żywieniowych, czy też wynika z koncentracji spożycia produktów o wysokim wpływie środowiskowym w poszczególnych dniach tygodnia.

Średni dobowy ślad wodny (WF) oraz ślad węglowy (CF) na podstawie siedmiodniowych dzienniczków żywieniowych obliczył samodzielnie każdy student. Oprócz średnich wartości wyznaczono współczynnik zmienności (CV), opisujący względną zmienność tygodniowego śladu środowiskowego, oraz indeks Herfindahla–Hirschmana (HHI), wykorzystany do oceny koncentracji tygodniowego rozkładu śladu środowiskowego. Zastosowany zestaw wskaźników umożliwił ocenę średniego poziomu śladu środowiskowego (mean), jego względnej zmienności w czasie (CV) oraz stopnia koncentracji tygodniowego rozkładu śladu środowiskowego (HHI). Współczynnik zmienności CV obliczono na podstawie wzoru (1) a indeks Herfindahla–Hirschmana (HHI) na podstawie wzoru (2):

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\% \tag{1}$$

gdzie: CV– współczynnik zmienności [%], SD– odchylenie standardowe dobowych wartości śladu środowiskowego w ciągu 7 dni, $\bar{x}$– średnia dobowa wartość śladu środowiskowego z 7 dni.

$$HHI = \sum_{i=1}^{7} \left(\frac{x_i}{\sum_{j=1}^{7} x_j} \right)^2 \tag{2}$$

gdzie: x_i oznacza dobową wartość śladu środowiskowego w i-tym dniu tygodnia, a $i = 1, \ldots, 7$ oznacza kolejne dni siedmiodniowego okresu obserwacji.

W celu oceny czynników związanych ze zróżnicowaniem środowiskowego wpływu diet przeprowadzono odrębne modele regresji wielorakiej dla śladu wodnego oraz śladu węglowego. Zmiennymi zależnymi były odpowiednio średni dobowy ślad wodny i średni dobowy ślad węglowy, natomiast zmiennymi objaśniającymi były ślady wodne i węglowe związane z produktami importowanymi oraz produktami pochodzenia zwierzęcego, wyrażone jako średnie dobowe wartości śladu przypisane produktom importowanym oraz produktom pochodzenia zwierzęcego. Do interpretacji wpływu poszczególnych predyktorów wykorzystano standaryzowane współczynniki regresji (β), umożliwiające bezpośrednie porównanie względnej siły oddziaływania poszczególnych zmiennych objaśniających (wzór 3).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (3)$$

gdzie:
Y – średni dobowy ślad środowiskowy (WF lub CF),
β_0 – wyraz wolny,
β_1, β_2 – współczynniki regresji dla poszczególnych zmiennych objaśniających,
X_1 – średni dobowy ślad środowiskowy związany z produktami importowanymi,
X_2 – średni dobowy ślad środowiskowy związany z produktami pochodzenia zwierzęcego,
ε – składnik losowy.

WYNIKI I DYSKUSJA

Jak duży jest ślad środowiskowy badanych diet?

Średni dobowy ślad wodny badanych diet wyniósł 2162,1 dm^3/d, przy odchyleniu standardowym wynoszącym 972,4 dm^3/d (Tabela 1). Wartości indywidualne mieściły się w przedziale od 687,0 dm^3/d do 4634,3 dm^3/d, co wskazuje na znaczne zróżnicowanie śladu wodnego diet studentów. Średni dobowy ślad węglowy wyniósł 3,47 kg CO_2e/d, a odchylenie standardowe (SD) 1,65 kg CO_2e/d. Zakres uzyskanych wartości wynosił od 1,28 do 11,75 kg CO_2e/d, co również wskazuje na dużą zmienność między analizowanymi dietami. W obu przypadkach szeroki zakres obserwowanych wartości świadczy o istotnym zróżnicowaniu środowiskowego oddziaływania indywidualnych wzorców żywieniowych.

Tabela 1. Statystyki opisowe dobowego śladu wodnego (WF) i śladu węglowego (CF) badanych diet
Table 1. Descriptive statistics of the daily water footprint (WF) and carbon footprint (CF) of the analyzed diets.

Ślad / Footprint	Średnia / Mean	Minimum / Minimum	Maksimum / Maximum	Odchylenie standardowe / Standard deviation
Ślad wodny / Water footprint [dm^3/d]	2162,1	687,0	4634,3	972,4
Ślad węglowy / Carbon footprint [kg CO_2e/d]	3,47	1,28	11,75	1,65

Źródło / Source: Own elaboration

Uzyskany średni ślad wodny diety jest niższy niż mediana dla Europy (3227 dm^3/d) raportowana w systematycznym przeglądzie (Harris i in., 2020). Zakres (min–max) pokrywa się z globalnym zakresem dla diet, który wynosi od 193 do 4368 dm^3/d (Kenđel Jovanović i in., 2026). Tak duża rozpiętość potwierdza, że ślad wodny jest wskaźnikiem silnie uzależnionym od indywidualnych wyborów. Średnia wartość śladu węglowego jest niższa niż globalna średnia szacowana na 4,4 kg CO_2e/d (Kalmpourtzidou i in., 2025). Uzyskana w badaniu wartość 3,47 kg CO_2e/d jest zbliżona do emisji związanych z dietami zgodnymi z wytycznymi żywieniowymi (Food-Based Dietary Guidelines, FBDG), które wynoszą od 3,0 kg CO_2e/d w krajach Europy Południowej do 5,1 kg CO_2e/d w krajach Europy Północnej (Kalmpourtzidou i in., 2025). Maksymalna wartość (11,75 kg CO_2e/d) wskazuje na obecność osób o skrajnie wysokim spożyciu mięsa (Jones i in., 2016; Machado i in., 2023). Badana grupa studentów reprezentuje relatywnie zrównoważone wzorce żywieniowe, ale wyniki wskazują na heterogeniczność środowiskową diet (Kalmpourtzidou i in., 2025). Niższe średnie w porównaniu z innymi grupami studenckimi w Europie mogą sugerować specyficzne uwarunkowania lokalne lub wyższą świadomość ekologiczną respondentów, jednak szerokie zakresy (szczególnie górne granice) wskazują na istnienie grupy o bardzo wysokiej presji na zasoby wodne i klimat (Kenđel Jovanović i in., 2026).

Które elementy diety odpowiadają za największą część presji środowiskowej?

Średni udział śladu środowiskowego związanego z produktami importowanymi wyniósł 498,1 dm^3/d, co odpowiadało 22,2% całkowitego śladu wodnego badanych diet (Tabela 2). Z kolei produkty pochodzenia zwierzęcego odpowiadały średnio za 1013,0 dm^3/d, stanowiąc 48,0% całkowitego śladu wodnego. W przypadku śladu węglowego średni udział produktów importowanych wyniósł 0,8 kg CO_2e/d (24,2% całkowitego śladu), natomiast produkty pochodzenia zwierzęcego odpowiadały za 1,8 kg CO_2e/d, co stanowiło średnio 51,0% całkowitego śladu węglowego. Wyniki wskazują, że produkty pochodzenia zwierzęcego stanowiły największą pojedynczą składową zarówno śladu wodnego, jak i śladu węglowego badanych diet, przy czym udział produktów importowanych był zbliżony w obu analizowanych wskaźnikach środowiskowych.

Tabela 2. Udział produktów importowanych (IP) i produktów pochodzenia zwierzęcego (AP) w dobowym śladzie wodnym (WF) i śladzie węglowym (CF) badanych diet

Table 2. Contribution of imported food products (IP) and animal-based products (AP) to the daily water footprint (WF) and carbon footprint (CF) of the analyzed diets.

Ślad produktów / Footprint of products	**IP [dm^3/d] [kg CO_2e/d]**	**IP [%]**	**AP [dm^3/d], [kg CO_2e/d]**	**AP [%]**
Ślad wodny / Water footprint	498,1	22,2	1013,0	48,0
Ślad węglowy / Carbon footprint	0,8	24,2	1,8	51,0

Źródło / Source: Own elaboration

Ustalenie, że produkty zwierzęce odpowiadają za 48,0% śladu wodnego (WF) oraz 51,0% śladu węglowego (CF), są spójne z kluczowymi wnioskami z literatury. W zakresie śladu węglowego, wynik 51% mieści się blisko zakresu podawanego przez Poore'a i Nemecka (2018), którzy szacują, że mięso, akwakultura, jaja i nabiał generują 56–58% emisji związanych z żywnością (Poore i Nemeck, 2018). Inne źródła wskazują nawet na wyższy udział (72–78%) w całkowitych emisjach rolniczych (Springmann i in., 2018). Udział 48,0% w WF jest zbliżony do wzorców obserwowanych w krajach zachodnich. Przykładowo, w USA produkty zwierzęce odpowiadają za 56% całkowitego WF, podczas gdy w Hiszpanii i we Włoszech wartości te są niższe (odpowiednio 41% i 38%) (Camporesi i Bordoni, 2025).

Udział produktów importowanych wynoszący 22,2% dla WF i 24,2% dla CF odzwierciedla występowanie zjawiska telecoupling, czyli powiązań społeczno-ekologicznych zachodzących między odległymi regionami w globalnym systemie żywnościowym. Badania wskazują, że kraje o wysokich dochodach często przenoszą część presji środowiskowej poza własne granice poprzez import produktów, a wraz z nimi tzw. wirtualnej wody, nierzadko pochodzącej z regionów dotkniętych deficytem zasobów wodnych (Vanham i in., 2018). Zbliżony udział śladu środowiskowego przypisanego produktom importowanym w całkowitym śladzie wodnym i węglowym sugeruje, że import żywności stanowi porównywalne źródło oddziaływań w obu analizowanych kategoriach środowiskowych (Jones i in., 2016).

W celu oceny czynników związanych ze zróżnicowaniem środowiskowego wpływu diet opracowano odrębne modele regresji wielorakiej dla śladu wodnego oraz śladu węglowego (Tabela 3). Oba modele były istotne statystycznie ($p<0,001$) i charakteryzowały się wysokim stopniem dopasowania do danych, wyjaśniając odpowiednio 73,7% zmienności śladu wodnego oraz 70,2% zmienności śladu węglowego. W modelu śladu wodnego zarówno ślad produktów importowanych, jak i ślad produktów pochodzenia zwierzęcego wykazywały istotny dodatni związek ze średnim dobowym śladem wodnym ($p < 0,001$). Silniejszy związek ze zmienną zależną stwierdzono dla śladu produktów importowanych ($\beta = 0,623$) niż dla śladu produktów pochodzenia zwierzęcego ($\beta = 0,508$). W modelu śladu węglowego najsilniejszy związek ze zmienną zależną wykazywał ślad produktów pochodzenia zwierzęcego ($\beta = 0,770$; $p < 0,001$), natomiast ślad produktów importowanych charakteryzował się niższą wartością standaryzowanego współczynnika regresji ($\beta = 0,206$; $p = 0,007$). Wyniki wskazują na odmienne znaczenie analizowanych komponentów w odniesieniu do zróżnicowania śladu wodnego i śladu węglowego, przy czym produkty importowane wykazywały silniejszy związek ze śladem wodnym, natomiast produkty pochodzenia zwierzęcego – ze śladem węglowym.

Tabela 3. Wyniki regresji wielorakiej dla śladu wodnego i śladu węglowego
Table 3. Multiple regression results for water footprint and carbon footprint.

Zmienna zależna / Dependent variable	Zmienna objaśniająca / Predictor	β	SE	B	t	p
Ślad wodny / Water footprint	Stała / Constant	655,401	134,607	–	4,869	<0,001
	Produkty importowane (WF IP) / Imported food products (WF IP)	1,574	0,170	0,623	9,245	<0,001
	Produkty pochodzenia zwierzęcego (WF AP) / Animal-based products (WF AP)	0,707	0,094	0,508	7,540	<0,001
Ślad węglowy / Carbon footprint	Stała / Constant	1,386	0,248	–	5,586	<0,001
	Produkty importowane (CF IP) / Imported food products (CF IP)	0,690	0,248	0,206	2,782	0,007
	Produkty pochodzenia zwierzęcego (CF AP) / Animal-based products (CF AP)	0,829	0,080	0,770	10,415	<0,001

Objaśnienia: β – niestandaryzowany współczynnik regresji, SE – błąd standardowy współczynnika β, B – standaryzowany współczynnik regresji, t – statystyka t, p – poziom istotności / Note: β – unstandardized regression coefficient; SE – standard error of the regression coefficient β; B – standardized regression coefficient; t – t-statistic; p – significance level.

Źródło / Source: Own elaboration

Charakterystyka tygodniowej zmienności śladu środowiskowego

Dla każdego respondenta, oprócz średniego dobowego śladu wodnego (WF) i śladu węglowego (CF), obliczono współczynnik zmienności (CV) oraz indeks Herfindhala–Hirschmana (HHI), opisujące odpowiednio względną zmienność i koncentrację tygodniowego rozkładu śladu środowiskowego. Średni dobowy ślad wodny respondentów wynosił od 687 do 4634 dm^3/d, natomiast współczynnik zmienności wynosił od 4,7% do 102,0%. Wartości HHI mieściły się w przedziale 0,143–0,270, co wskazuje na zróżnicowany stopień koncentracji śladu wodnego w poszczególnych dniach tygodnia. Dla śladu węglowego wartości CV oraz HHI również wykazywały znaczną zmienność pomiędzy respondentami. Odpowiednie zakresy wynosiły 1,28–11,75 kg CO_2e/d, 8,6–86,5% dla współczynnika zmienności oraz 0,145–0,323 dla HHI. Wyniki te wskazują na znaczne zróżnicowanie zarówno poziomu śladu środowiskowego, jak i jego tygodniowego rozkładu pomiędzy respondentami.

Analiza korelacji wykazała, że zarówno dla śladu wodnego, jak i śladu węglowego średni poziom śladu środowiskowego był słabo skorelowany ze wskaźnikami opisującymi jego rozkład w czasie ($|r| \leq 0,239$). Jednocześnie pomiędzy współczynnikiem zmienności (CV) i indeksem Herfindhala–Hirschmana (HHI) stwierdzono silne dodatnie korelacje (WF: $r = 0,881$; CF: $r = 0,839$). Wyniki wskazują, że poziom śladu środowiskowego oraz sposób jego rozkładu w czasie stanowią odrębne aspekty charakterystyki badanych diet, natomiast CV i HHI opisują powiązane, lecz nie tożsame właściwości tygodniowego rozkładu śladu środowiskowego.

Uzyskane wyniki dotyczące tygodniowej zmienności śladu środowiskowego stanowią istotne rozszerzenie dotychczasowych analiz literaturowych, wypełniając zidentyfikowaną wcześniej lukę badawczą dotyczącą dynamicznych aspektów wyborów żywieniowych. Analiza współczynnika zmienności (CV) i indeksu Herfindahla–Hirschmana (HHI) jest odpowiedzią na wskazywany w literaturze brak badań nad tygodniową dynamiką śladu środowiskowego (Vanham i in., 2019). Większość dotychczasowych badań dotyczących wpływu środowiskowego diet opiera się na danych zagregowanych na poziomie populacji (np. FAOSTAT Food Balance Sheets) lub na narzędziach służących do oceny utrwalonego sposobu żywienia, takich jak kwestionariusze częstości spożycia żywności (Food Frequency Questionnaire, FFQ) (Vanham i in., 2019; Harris i in., 2020).

Podejścia te umożliwiają ocenę przeciętnego wzorca żywieniowego, jednak nie pozwalają na analizę zmienności pomiędzy poszczególnymi dniami tygodnia (Jones i in., 2016). Uzyskane w niniejszym badaniu wartości HHI (0,143–0,270) wskazują, że respondenci różnili się stopniem koncentracji presji środowiskowej w czasie. Dla części badanych rozkład śladu środowiskowego był niemal równomierny w ciągu tygodnia (wartość minimalna 0,143 była bardzo zbliżona do teoretycznego minimum wynoszącego 1/7 = 0,143), podczas gdy u innych znaczna część całkowitego śladu przypadała na niewielką liczbę dni. Wyniki te sugerują, że podobny średni ślad środowiskowy może wynikać z odmiennych wzorców konsumpcji – od regularnie rozłożonego spożycia po koncentrację produktów o wysokim wpływie środowiskowym w wybranych dniach tygodnia. Aspekt ten pozostaje stosunkowo rzadko analizowany w badaniach koncentrujących się na średnich wartościach opisujących zwyczajowe wzorce żywieniowe (Hatjiathanassiadou i in., 2023). Słaba korelacja ($|r| \leq 0{,}239$) między średnim poziomem śladu a jego zmiennością czasową sugeruje, że bycie konsumentem o "wysokim śladzie" nie determinuje tego, czy dieta jest monotonna (stabilna), czy zróżnicowana (zmienna). Dotychczasowe badania nad zrównoważonymi dietami koncentrują się przede wszystkim na średnich wartościach charakteryzujących utrwalone wzorce żywieniowe (Hatjiathanassiadou i in., 2023; Kenđel Jovanović i in., 2026). Wyniki niniejszego badania pokazują jednak, że uwzględnienie zmienności między dniami ujawnia istotne różnice w dietach o podobnym średnim śladzie środowiskowym. Identyczny średni poziom oddziaływania może wynikać zarówno z regularnego, umiarkowanego spożycia produktów pochodzenia zwierzęcego, jak i z rzadszych, lecz bardzo intensywnych epizodów ich konsumpcji. Silna dodatnia korelacja między CV a HHI ($r > 0{,}8$) potwierdza, że oba te wskaźniki skutecznie wychwytują "nierównomierność" obciążenia środowiskowego, co czyni je wiarygodnymi narzędziami do opisu struktury czasowej diety. Tradycyjne wskaźniki, takie jak Planetary Health Diet Index (PHDI) czy Mediterranean Diet Score (MDS), oceniają jakość i adekwatność diety, ale pomijają jej stabilność (Machado i in., 2023; Kenđel Jovanović i in., 2025; Kenđel Jovanović i in., 2026). Niniejsze badania sugerują, że pełna charakterystyka "zrównoważenia" powinna obejmować nie tylko poziom presji środowiskowej, ale także jej rozkład, ponieważ diety o wysokiej koncentracji wpływu w krótkim czasie (wysoki HHI) mogą być trudniejsze do skorygowania za pomocą prostych interwencji edukacyjnych niż diety o stabilnym, wysokim wpływie (Kenđel Jovanović i in., 2025; Kenđel Jovanović i in., 2026). Podsumowując, dane ilościowe dowodzą, że poziom i rozkład czasowy śladu to dwa niezależne wymiary presji środowiskowej, co stanowi istotny wkład w metodologię oceny zrównoważonych systemów żywnościowych.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały, że średnia wartość śladu środowiskowego nie jest wystarczająca do kompleksowej oceny środowiskowego oddziaływania diet. Po pierwsze, ślad wodny i ślad węglowy okazały się wskaźnikami komplementarnymi, opisującymi odmienne źródła presji środowiskowej. Po drugie, poziom śladu środowiskowego był w dużej mierze niezależny od jego tygodniowej zmienności i koncentracji, co wskazuje, że analiza średnich wartości powinna być uzupełniona oceną rozkładu śladu w czasie. Po trzecie, modele regresji wykazały, że

determinanty śladu wodnego i śladu węglowego różnią się, co potwierdza konieczność jednoczesnego uwzględniania obu wskaźników przy ocenie zrównoważenia środowiskowego diet.

Uzyskane wyniki wskazują, że ocena środowiskowego wpływu diet powinna opierać się nie tylko na wielkości śladu środowiskowego, ale również na analizie jego struktury oraz identyfikacji rzeczywistych źródeł presji środowiskowej wynikających z wyborów żywieniowych. Przedstawione podejście częściowo wypełnia zidentyfikowaną lukę badawczą poprzez rozszerzenie oceny śladu środowiskowego o analizę tygodniowej zmienności oraz identyfikację determinant śladu wodnego i śladu węglowego. Uzyskane wyniki wskazują, że analiza tygodniowej zmienności śladu środowiskowego może stanowić użyteczne uzupełnienie standardowych metod oceny zrównoważenia diet.

SPIS LITERATURY

1. Camporesi, G.; Bordoni, A. (2025). *Balancing Nutritional and Environmental Sustainability Through the Evaluation of the Water Footprint of the Recommended Italian*, *Spanish, and American Diets.* Nutrients, 17(1), 23. https://doi.org/10.3390/nu17010023.
2. Clark, M.; Springmann, M.; Rayner, M.; Scarborough, P.; Hill, J.; Tilman, D.; Macdiarmid, J.I.; Fanzo, J.; Bandy, L.; Harrington, R.A. (2022*). Estimating the environmental impacts of 57,000 food products.* Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 119(33), e2120584119. https://doi.org/10.1073/pnas.2120584119.
3. Clonan, A.; Roberts, K.E.; Holdsworth, M. (2016). *Socioeconomic and demographic drivers of red and processed meat consumption: Implications for health and environmental sustainability.* Proceedings of the Nutrition Society, 75(3), 367–373. https://doi.org/10.1017/S0029665116000100.
4. Harris, F.; Moss, C.; Joy, E.J.M.; Quinn, R.; Scheelbeek, P.F.D.; Dangour, A.D.; Green, R. (2020). *The Water Footprint of Diets: A Global Systematic Review and Meta-analysis.* Advances in Nutrition, 11(2), 375–386. https://doi.org/10.1093/advances/nmz091.
5. Hatjiathanassiadou, M.; Rolim, P. M.; Seabra, L.M.J. (2023). *Nutrition and its footprints: Using environmental indicators to assess the nexus between sustainability and food.* Frontiers in Sustainable Food Systems, 6, 1078997. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1078997.
6. Henriksson, P.J.G.; Cucurachi, S.; Guinée, J.B.; Heijungs, R.; Troell, M.; Ziegler, F. (2021). *A rapid review of meta-analyses and systematic reviews of environmental footprints of food commodities and diets.* Global Food Security, 28, 100508. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100508.
7. Jones, A.D.; Hoey, L.; Blesh, J.; Miller, L.; Green, A.; Shapiro, L.F. (2016). *A systematic review of the measurement of sustainable diets.* Advances in Nutrition, 7(4), 641–664. https://doi.org/10.3945/an.115.011015.
8. Kalmpourtzidou, A.; Biasini, B.; Rosi, A.; Scazzina, F. (2025). *Environmental impact of current diets and alternative dietary scenarios worldwide: A systematic review.* Nutrition Reviews, 83(9), 1678–1710. https://doi.org/10.1093/nutrit/nuae215.
9. Kenđel Jovanović, G.; Krešić, G.; Dujmić, E.; Pavičić Žeželj, S. (2025). *Adherence to the Planetary Health Diet and Its Association with Diet Quality and Environmental Outcomes in Croatian University Students: A Cross-Sectional Study.* Nutrients, 17(11), 1850. https://doi.org/10.3390/nu17111850.
10. Kenđel Jovanović, G.; Krešić, G.; Dujmić, E.; Sabljak, M.; Pavičić Žeželj, S. (2026). *Changes in Dietary Patterns and Environmental Footprints Among University Students: A Retrospective Study.* International Journal of Environmental Research and Public Health, 23(1), 83. https://doi.org/10.3390/ijerph23010083.

11. Ludwig-Borycz, E.; Neumark-Sztainer, D.; Larson, N.; Baylin, A.; Jones, A.D.; Webster, A.; Bauer, K.W. (2023). *Personal, behavioural and socio-environmental correlates of emerging adults' sustainable food consumption in a cross-sectional analysis.* Public Health Nutrition, 26(6), 1175–1186. https://doi.org/10.1017/S1368980023000654.
12. Machado, P.; McNaughton, S.A.; Livingstone, K.M.; Hadjikakou, M.; Russell, C.; Wingrove, K.; Sievert, K.; Dickie, S.; Woods, J.; Baker, P.; Lawrence, M. (2023). *Measuring adherence to sustainable healthy diets: A scoping review of dietary metrics.* Advances in Nutrition, 14(1), 147–160. https://doi.org/10.1016/j.advnut.2022.11.006.
13. Poore, J.; Nemecek, T. (2018). *Reducing food's environmental impacts through producers and consumers.* Science, 360(6392), 987–992. https://doi.org/10.1126/science.aaq0216.
14. Rupasinghe, W.A.W.S.; Perera, H.T.S.; Wickramaratne, N.M. (2020). *A comprehensive review on dietary assessment methods in epidemiological studies.* Journal of Public Health and Nutrition, 3(2), 204–211.
15. Singh, R.; Verest, M.T.E.; Salathé, M. (2025). *Minimum days estimation for reliable dietary intake information: Findings from a digital cohort.* European Journal of Clinical Nutrition, 79(10), 1007–1017. https://doi.org/10.1038/s41430-025-01644-8.
16. Springmann, M.; Clark, M.; Mason-D'Croz, D.; Wiebe, K.; Bodirsky, B.L.; Lassaletta, L.; de Vries, W.; Vermeulen, S.J.; Herrero, M.; Carlson, K.M.; Jonell, M.; Troell, M.; DeClerck, F.; Gordon, L.J.; Zurayk, R.; Scarborough, P.; Rayner, M.; Loken, B.; Fanzo, J.; Godfray, H.C.J.; Tilman, D.; Rockström, J.; Willett, W. (2018). *Options for keeping the food system within environmental limits.* Nature, 562(7728), 519–525. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0
17. Tilman, D.; Clark, M. (2014). *Global diets link environmental sustainability and human health.* Nature, 515(7528), 518–522. https://doi.org/10.1038/nature13959.
18. Vanham, D.; Comero, S.; Gawlik, B.M.; Bidoglio, G. (2018). *The water footprint of different diets within European sub-national geographical entities.* Nature Sustainability, 1(9), 518–525. https://doi.org/10.1038/s41893-018-0133-x.
19. Vanham, D., Leip, A., Galli, A., Kastner, T., Bruckner, M., Uwizeye, A., van Dijk, K., Ercin, E., Dalin, C., Brandão, M., Bastianoni, S., Fang, K., Leach, A., Chapagain, A.; van der Velde, M.; Sala, S.; Pant, R.; Mancini, L.; Monforti-Ferrario, F.; … , Hoekstra, A.Y. (2019). *Environmental footprint family to address local to planetary sustainability and deliver on the SDGs.* Science of the Total Environment, 693, 133642. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133642.
20. Willett, W.; Rockström, J.; Loken, B.; Springmann, M.; Lang, T.; Vermeulen, S.; Garnett, T.; Tilman, D.; DeClerck, F.; Wood, A.; Jonell, M.; Clark, M.; Gordon, L.J.; Fanzo, J.; Hawkes, C.; Zurayk, R.; Rivera, J.A.; De Vries, W.; Sibanda, L. M.; …, Murray, C.J.L. (2019). *Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems.* The Lancet, 393(10170), 447–492. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4.
21. https://www.waterfootprint.org/.
22. https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food/.
23. https://www.co2everything.com/.

Autor korespondencyjny: Agnieszka Karczmarczyk
ORCID: 0000-0002-1565-3501
e-mail: agnieszka_karczmarczyk@sggw.edu.pl

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego,
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury,
Katedra Kształtowania Środowiska i Teledetekcji
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Otrzymano: 09.07.2026
Zwrócono po recenzji: 02.09.2026
Opublikowano: 03.09.2026