

ANALIZA ŚLADU WODNEGO PRZYKŁADOWYCH PRODUKTÓW ROLNO-SPOŻYWCZYCH

Magdalena Wróbel-Jędrzejewska, Urszula Steplewska, Elżbieta Polak

Instytut Biotechnologii Przemysłu Rolno-Spożywczego im. prof. Waława Dąbrowskiego,
Zakład Technologii i Techniki Chłodnictwa,
Al. Marszałka J. Piłsudskiego 84, 92-202 Łódź

magdalena.jedrzejewska@ibprs.pl

Streszczenie

Przedstawiono założenia do wyznaczania śladu wodnego (WF) produktów spożywczych, a także upraw płodów rolnych. Przeprowadzono analizę metodologii wyznaczania śladu wodnego dla wybranych sektorów: rolnictwa, przemysłu mleczarskiego, winiarskiego i produktów gotowych na podstawie danych literaturowych. Zaprezentowano badania śladu wodnego zbóż, a w szczególności skupiono się na uprawach pszenicy i kukurydzy. Opisano ślad wodny, a także uwzględniono ekonomiczną wydajność wody w produktach mleczarskich takich jak: mleko, śmietana, serwatka, ser, maślanka i jogurt, które odznaczają się wysokim poziomem zużycia wody. Omówiono analizę śladu wodnego dla produktu gotowego na przykładzie zupy i wskazano najważniejsze etapy odpowiedzialne za wytworzenie tego śladu wodnego. Przeanalizowano również ślad wodny produkcji makaronu stosując metodologię oceny cyklu życia (LCA). Scharakteryzowano WF wina z zastosowaniem nowo opracowanej metodologii w porównaniu z klasyczną.

Stwierdzono, że wartość śladu wodnego danego produktu rolno-spożywczego różni się w zależności od zakresu badawczego i warunków klimatycznych.

Słowa kluczowe: ślad wodny, efektywność zużycia wody, przemysł rolno-spożywczy, ocena cyklu życia (LCA)

WATER FOOTPRINT ANALYSIS FOR AGRICULTURAL AND FOOD PRODUCTS EXAMPLES

Summary

The assumptions for determining the water footprint (WF) of food products as well as agricultural crops were presented. The methodology of determining the water footprint for selected sectors: agriculture, dairy industry, wine industry and finished products, based on literature data, was analyzed. The studies on WF of cereals were presented, in particular, the focus was on wheat and maize cultivations. A water footprint has been described, as well as economic water efficiency in dairy products such as milk, cream, whey, cheese, buttermilk and yoghurt, which are characterized by a high level of water usage. The analysis of water footprint for the finished product on the example of soup was discussed and the most important stages responsible for the production of WF were indicated. The water footprint of pasta production was also analyzed using the Life Cycle Assessment methodology (LCA). Wine was characterized using the newly developed methodology in comparison with the classical one.

It was found that the value of the water footprint of a given agri-food product varies depending on the research scope and climatic conditions.

Keywords: water footprint, water usage efficiency, agri-food industry, life cycle assessment (LCA)

WSTĘP

Ochrona środowiska i podejmowanie działań mających na celu poprawę jego stanu, dokonywana jest w ostatnich latach, m.in. poprzez analizy środowiskowe, które mogą być wykorzystane w działaniach m.in. na rzecz odnawiania zasobów przyrody i przyczynić się do zachowania jego zrównoważonego użytkowania.

Najbardziej rozpowszechnioną metodyką oceny wpływu na środowisko jest ocena cyklu życia – LCA (Life Cycle Assessment). W tym celu wykorzystywane są metody analizowania zużycia wody bezpośrednio i pośrednio związanej z produktami i usługami. Umożliwia to lepsze zrozumienie powiązań między działalnością człowieka, a rosnącym zapotrzebowaniem na wodę. Wskaźnik śladu wodnego (Water Footprint - WF) zdefiniowany przez Arjen Y. Hoekstra w 2002 r. jako wszechstronny wskaźnik zużycia zasobów wody słodkiej. Wyróżnia się w nim następujące składowe:

- zielony ślad wodny - objętość wody opadowej, która nie spływa powierzchniowo (ewapotranspiracja),
- niebieski ślad wodny - objętość zużytej wody powierzchniowej i podziemnej (parowanie, transfer, produkcja),
- szary ślad wodny - objętość wody, która byłaby konieczna do rozcieńczenia zanieczyszczeń do takiego stopnia, aby jakość wody nie była gorsza od obowiązujących standardów.

Metoda ilościowego określenia śladu wodnego została opracowana przez Hoekstra i Hung [2002]. Od tego czasu przeprowadzono szereg badań dotyczących zarówno produkcji rolnej, jak i faz przetwarzania, aż do konsumenta i usuwania odpadów. Ponadto, rozpowszechniono przepisy dotyczące ochrony wody. Ślad wodny został znormalizowany przez normę ISO 14046 [ISO, 2014]. Unia Europejska określiła ramową dyrektywę wodną [Komisja Europejska, 2010] w celu poprawy jakości i produktywności wody oraz przeciwdziałaniu niedoborom we wszystkich państwach członkowskich UE.

Ogólne założenia metodyki obliczania śladu wodnego są podobne dla różnych rodzajów produktów, zarówno pochodzenia rolniczego, czy przemysłowego, ale wymagają doprecyzowania pewnych założeń. W przypadku produktów spożywczych, ślad wodny jest zazwyczaj wyrażany w jednostkach $[m^3/Mg]$ lub $[l/kg]$. W określonych przypadkach, jest również możliwość przedstawienia go jako objętość wody na sztukę $[m^3/szt.]$. Dla produktów przemysłowych, ślad wodny może być wyrażony w jednostkach $[m^3/EUR]$ lub $[m^3/szt.]$. Inne sposoby wyrażania śladu wodnego produktu to na przykład $[m^3/kcal]$ (w przypadku produktów spożywczych w kontekście diety) lub $[m^3/J]$ (dla energii elektrycznej lub paliw).

W celu wyznaczenia śladu wodnego produktu końcowego najlepiej rozpocząć obliczenia dla podstawowych substratów uwzględniając łańcuch dostaw. Następnie należy określić ślady wodne produktów pośrednich, aż do momentu, gdy możliwe będzie obliczenie śladu wodnego produktu końcowego. Pierwszym krokiem jest zawsze uzyskanie śladów wodnych surowców wejściowych i wody wykorzystywanej do ich przetwarzania. Tak wyznaczona wartość jest następnie rozdzielana na różne produkty wyjściowe. Ta czynność jest wykonywana w oparciu o informacje na temat procentowego udziału produktu w całym cyklu. Parametr udziału produktu najlepiej jest przyjąć z literatury dostępnej dla określonych procesów [Chapagain, Hoekstra 2004]. Posiada on dość wąski zakres zależny w znacznym stopniu od konkretnego sposobu produkcji. Ważne są tu informacje na temat tego, jaki typ procesu jest stosowany w rozważanym przypadku. Kolejny wskaźnik - wartość udziału produktu, zmienia się w ciągu lat w zależności od zakresu cen. Uniknięcie dużego wpływu wahań cen na wynik obliczeń

ślądu wodnego jest możliwe jedynie poprzez szacowanie wartości udziału w oparciu o średnie ceny z co najmniej pięciu lat. Wyznaczone wskaźniki najczęściej dotyczą różnych upraw i produktów zwierzęcych.

Ślad wodny konkretnego procesu jednostkowego może się zmieniać w zależności od rodzaju zastosowanej metody, na przykład: mokre lub suche mielenie, czyszczenie na sucho lub na mokro, zamknięty układ chłodzenia lub otwarty system chłodzenia z odparowaniem wody. Dla wielu procesów literatura podaje szacunkowe wartości poboru wody [FAO 2003; Chapagain, Hoekstra 2004]. Dane ogólne na temat zanieczyszczeń generowanych przez procesy są stosunkowo ubogie. Różnią się one bardzo w zależności od miejsca, więc użycie ogólnych szacunków jest niewłaściwe. Z tego powodu, danych należy szukać u źródła, a mianowicie w zakładach produkcyjnych oraz podchodzić indywidualnie do analizy każdego procesu.

WYTYCZNE DO ANALIZY ŚLADU WODNEGO

Na pełny obraz śladu wodnego (WF) składają się trzy rodzaje:

- niebieski - woda powierzchniowa i gruntowa, wykorzystywane do nawadniania, woda skonsumowana w rezultacie produkcji dóbr lub usług,
- zielony - woda deszczowa (opadowa) skonsumowana (z wilgoci glebowej) w czasie procesu produkcji, jak i ulegająca ewapotranspiracji (parowanie powierzchniowe),
- szary - woda niezbędna do rozcieńczenia wody skażonej/zanieczyszczonej do akceptowalnego normami poziomu.

Znaczenie śladu wodnego wiąże się z koniecznością uzyskania informacji na temat zawartości wody w produktach. Ocenę śladu wodnego produktu, powinno się zacząć od poznania sposobu jego wytwarzania. Najpierw należy zidentyfikować system produkcyjny wraz z operacjami jednostkowymi wchodzącymi w skład kolejnych etapów wytwarzania produktu. Konieczne jest również określenie zakresu analizy, który zostanie poddany analizie w kontekście wyznaczenia tego wskaźnika. Do oszacowania zużycia wody finalnego produktu, potrzebny jest schemat systemu, który zawiera także etapy produkcji wszystkich surowców. Konieczne jest określenie pochodzenia produktu i ocena jego wpływu na ślad wodny. Wykonanie schematu systemu produkcyjnego z podziałem na poszczególne etapy jednostkowe procesu wymaga wprowadzenia założeń i uproszczeń. Wiele procesów produkcyjnych zawiera elementy cykliczne, co wymusza dogłębną analizę w celu właściwego uwzględnienia ilości wprowadzonej wody w sieć połączonych etapów procesu. W praktyce

konieczna jest szczegółowa analiza w tych punktach, w których otrzymamy istotne informacje do wyznaczenia śladu wodnego.

WF został rozpowszechniony w ostatniej dekadzie, a jego metodologia i cele zostały przeniesione z globalnych analiz dotyczących handlu wodą do lokalnych szczegółowych analiz ilości wody bezpośrednio i pośrednio związanej z produktem. Co więcej, literatura wykazała pewną krytykę dotyczącą stosowania WF, szczególnie w przypadku, gdy podejmowanie decyzji wydawało się być zależne od ilości wody zawartej w produktach. Tak zdefiniowany wskaźnik WF nie może być stosowany jako miara zrównoważenia produkcji, ponieważ należy wziąć pod uwagę kontekst lokalny, klimatyczny i technologiczny. W szczególności zielony, niebieski i szary ślad wodny nie mogą być rozpatrywane na tym samym poziomie gospodarczym, społecznym i środowiskowym. Niebieski ślad wodny jest najważniejszy w podejmowaniu decyzji, ponieważ stanowi bezpośredni koszt dla społeczeństwa. Trzeba rozwijać inne metody obliczeniowe WF, aby ten wskaźnik był bardziej użyteczny w kontekście różnych produkcji rolno-spożywczych.

Ślad wodny został wprowadzony jako wskaźnik objętościowego pomiaru zapotrzebowania na wodę, np. dla danego produktu lub technologii. Natomiast, w 2016 r. sam autor koncepcji pomiaru śladu wodnego [Hoekstra 2016] przedstawia uwagi do tego podejścia. Jego rozważania skupiają się na następujących kwestiach, m.in. różnic przy obliczaniu zużycia wody ze względu na poziom lokalny czy pomijanie zielonego WF. Rozważania na temat prawidłowości koncepcji WF w odniesieniu do łańcucha woda – żywność – energia – ekosystem są prowadzone do dziś. Analizy wykazały, że zarządzanie wodą oraz ślad wodny uwzględniają jedynie rolnicze, przemysłowe i domowe wykorzystanie wody [Vanham 2016]. Dodatkowo, niektóre ważne zużycia wody nie są uwzględniane jako osobne wartości lub w ogóle brane pod uwagę, np. „zielone” oraz „niebieskie” wody, m.in. dla: rolnictwa, chłodnictwa, energii wodnej, turystyki. Jako alternatywny sposób opracowania śladu wodnego dla produktów spożywczych zaproponowano metodę Water Footprint Network (WFN) [Atzori i in. 2016]. Wskaźnik zielonego śladu wodnego jest często pomijany w rozważaniach, ponieważ generuje niewielkie lub pomijalne koszty. Jednak wartość ta jest istotna w przypadku produktów spożywczych, dlatego zdaniem autorów powinna być uwzględniona w obliczeniach. Porównano metody WF i WFN analizując ślad wodny różnych produktów (mleko, mięso), biorąc pod uwagę różne sposoby hodowli i uprawy surowca. Nowa metoda WFN umożliwi dokładniejsze przedstawienie w sposób ilościowy zużycia wody. Z kolei zestawienie wskaźnika WF oraz efektywności zużycia wody (WUE) wykazuje, że korzystniejszym podejściem w produkcji roślinnej jest WF.

Poniżej scharakteryzowano różne ujęcia w metodologii analizy śladu wodnego w zależności od analizowanych produktów rolno-spożywczych.

ŚLAD WODNY PRODUKCJI ROLNICZYCH

Ślad wodny produkcji rolniczych został przedstawiony w publikacji [Lovarelli i in. 2016]. W szczególności skupiono się na zakresach produkcji bioenergii i uprawie surowców roślinnych. Ich celem była ocena migracji wody w produktach w skali globalnej. Dokonano określenia trzech składników śladu wodnego, dla wybranych upraw, w zdefiniowanych obszarach geograficznych. W tych ocenach pojawiły się podobieństwa dotyczące metodologii i zastosowanych narzędzi. Wykazano słabe i mocne strony wskaźnika śladu wodnego produkcji. W większości badań skupiono się na produkcji zbóż, wśród których szczególnie przeanalizowano uprawy kukurydzy i pszenicy [Lovarelli i in. 2016].

W literaturze spotyka się inny wskaźnik do oceny zużycia wody, jakim jest efektywność zużycia wody (WUE). Jest on definiowany jako stosunek plonów do wykorzystanej wody na uprawę. Dla uprawy pszenicy wyznaczono, zarówno WUE, jak i ślad wodny, każdy na przestrzeni 35 lat [Lu i in. 2016]. Stwierdzono nieliniową zależność między tymi wskaźnikami, ze względu na znaczący wzrost wykorzystania „szarej” wody. W obydwu przypadkach inne są wstępne założenia pomiarowe. Zatem, ślad wodny obejmuje nie tylko bezpośrednio, ale także pośrednie zużycie wody i jego wpływ na środowisko. Dzięki temu ukazuje bardziej wszechstronną ocenę zużycia wody w uprawach.

Zmiany śladu wodnego upraw różnych płodów rolnych, tj. pszenicy, ryżu, bawełny, rzepaku zostały zbadane na przestrzeni 10-ciu lat [Liu i in. 2017]. Największym spadkiem WF odznacza się uprawa ryżu. W przypadku pszenicy, również odnotowano niższe zużycie wód, jednak spadek ten nie jest tak spektakularny. Uprawa bawełny i rzepaku uległa jedynie niewielkiemu obniżeniu zużycia wody. Zmiany tych wskaźników wynikają z intensyfikacji procesu urbanizacji, poprzez zakłócenie naturalnego obiegu wody.

ŚLAD WODNY PRZEMYSŁU MLECZARSKIEGO

Określenie śladu wodnego jest jednym ze sposobów oceny zużycia wody wykorzystywanym również w przemyśle mleczarskim. Ważnym aspektem w dystrybucji wody jest jej ekonomiczna wydajność, która określa ilościowo wartość uzyskaną przez producentów na jednostkę wody wykorzystanej do wytworzenia określonego produktu.

Ekonomiczną produktywność wodną oblicza się po oszacowaniu faktycznego zużycia wody. Zostały przeprowadzone badania śladu wodnego i ekonomicznej wydajności wody pierwotnej produktów mleczarskich dla różnych systemów produkcyjnych [Owusu-Sekyere i in. 2017]. W związku z ograniczoną ilością informacji na temat ekonomicznego wykorzystania wody w sektorze hodowlanym, pierwszym krokiem była ocena ekonomicznej wydajności wodnej dla produktów mleczarskich w Afryce.

Tabela 1. Średnia zawartość niebieskiego, zielonego i szarego śladu wodnego dla różnych systemów produkcji w Afryce w latach 2006 – 2013 [Owusu-Sekyere i in. 2017]
Average content of blue, green and gray water footprint for various production systems in Africa in 2006 - 2013 [Owusu-Sekyere et al. 2017]

Produkty	System wypasu [m ³ /Mg]				System mieszany [m ³ /Mg]			
	WF _{niebieski}	WF _{zielony}	WF _{szary}	WF	WF _{niebieski}	WF _{zielony}	WF _{szary}	WF
Mleko o zawartości ≤ 1% tłuszczu	69	1 289	40	1 398	68	1 180	39	1 287
Mleko o zawartości ≥ 1% i ≤ 6% tłuszczu	70	1 263	41	1 374	69	1 185	41	1 295
Mleko i śmietana o zawartości ≥ 6% tłuszczu	75	1 914	74	2 063	68	1 583	73	1 724
Mleko w proszku o zawartości ≤ 1,5% tłuszczu	187	4 784	185	5 156	171	3 369	183	3 723
Mleko i śmietanka niesłodzona w proszku o zawartości 1,5% tłuszczu	187	4 784	185	5 156	171	3 369	183	3 723
Mleko i śmietanka słodzona w proszku o zawartości 1,5% tłuszczu	197	4 784	185	5 166	181	3 369	183	3 733
Mleko i śmietanka niesłodzona	62	1 591	62	1 715	57	1 383	61	1 501
Mleko i śmietanka słodzona	80	1 914	74	2 068	73	1 583	73	1 729
Jogurt	47	1 196	46	1 289	43	1 137	46	1 226
Serwatka	25	625	25	675	25	599	23	647
Masło	219	5 599	217	6 035	200	3 876	214	4 290
Ser i twaróg	125	3 204	124	3 453	115	2 386	123	2 624
Ser w proszku i tarty	215	5 086	197	5 498	198	3 557	195	3 950

Na tym kontynencie wody powierzchniowe i gruntowe wykorzystywane są do produkcji wybranych produktów mleczarskich. Definiowane są one ilościowo, jako niebieski ślad wodny tego produktu. Natomiast, woda deszczowa wykorzystywana do produkcji dowolnego z wybranych produktów mleczarskich jest określana ilościowo jako zielony ślad wodny. Analiza śladu wodnego została oparta na procedurze opisanej przez Hoekstra i in. [2011]. Przy obliczaniu śladu wodnego różnych roślin paszowych i produktów mlecznych postępowano zgodnie z procedurami oceny stosowanymi przez Mekonnen i Hoekstra [2012].

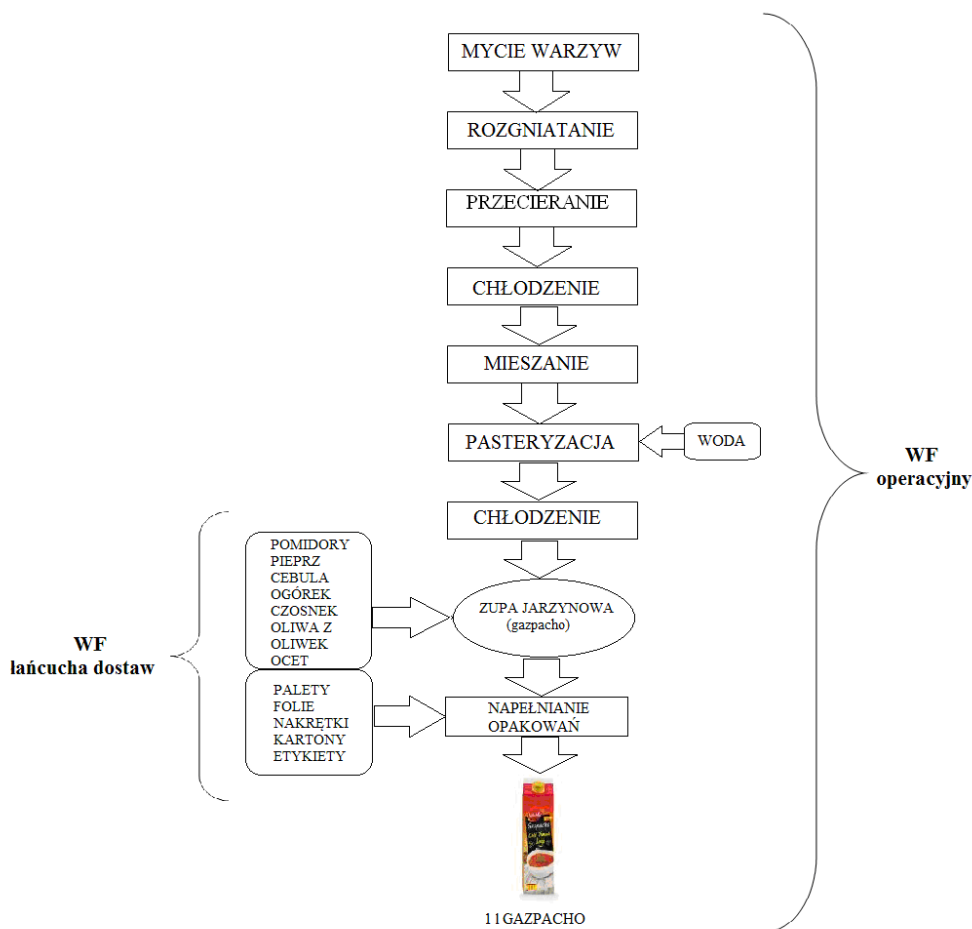
Średnia wartość śladu wodnego oparta na względnych wielkościach lokalnej produkcji i transportu została uwzględniona przy obliczaniu śladu wodnego składników pasz zwierzęcych. Otrzymane rezultaty pozwalają odpowiednio zarządzać zasobami wodnymi przez producentów wyrobów mleczarskich. Umożliwia to rozwój zrównoważonej produkcji i wskazanie bardziej wydajnych i ekonomicznych kierunków modernizacji produkcji. Według autorów, wartość śladu wodnego dla produktów mleczarskich (tj. masło, ser) kształtuje się na wysokim poziomie (tab. 1). Produkty mleczarskie takie jak mleko, śmietana, serwatka, ser, maślanka i jogurt, odznaczają się najwyższą ekonomiczną wydajnością wodną. Natomiast mleko i śmietanka w proszku o zawartości tłuszczu powyżej 1,5% oraz mleka i śmietany o zawartości tłuszczu przekraczającej 6% charakteryzowały się najniższą ekonomiczną produktywnością wody [Owusu-Sekyere i in. 2017].

ŚLAD WODNY PRODUKTÓW GOTOWYCH

Rosnące zapotrzebowanie na produkty gotowe wiąże się również ze wzrostem wykorzystania zasobów wody do ich wytworzenia. W związku z tym przemysł spożywczy został zmuszony do przyjęcia odpowiedniego podejścia do zarządzania wodą, aby zmniejszyć jej zapotrzebowanie. Dane dotyczące śladu wodnego dla dań gotowych, jak schłodzona zupa jarzynowa (gazpacho) przedstawiono w pracy [Ibáñez i in. 2017]. Wskaźnik ten obliczono zgodnie z metodologią opisaną w literaturze [Hoekstra i in. 2011]. Najpierw scharakteryzowano sposób i zakres badań dotyczący produkcji tej zupy. Badania te koncentrują się na oszacowaniu WF dla 1 l gazpacho wyprodukowanego w Hiszpanii. Na podstawie analizy systemu produkcji zupy zidentyfikowano najważniejsze etapy odpowiedzialne za wytworzenie śladu wodnego. Na rysunku 1 przedstawiono schemat produkcji wraz z niezbędnymi surowcami (tj. pomidor, papryka, cebula, ogórek, czosnek, oliwa z oliwek i ocet) i innymi materiałami potrzebnymi do produkcji gazpacho. Proces produkcji składa się z następujących etapów: mycie warzyw, rozgniatanie, przecieranie, mieszanie składników, pasteryzacja i chłodzenie. Świeżo przygotowane gazpacho pakuje się następnie w aseptyczne kartoniki. Badania te miały również na celu określenie wpływu na środowisko produkcji gazpacho w oparciu o wskaźniki niebieskiej składowej WF.

W celu poprawnego wyznaczenia WF gazpacho, uwzględniono również jego składową wynikającą z rzeczywistego łańcucha dostaw. W związku z tym, na całkowitą wartość WF składa się suma śladu wodnego operacyjnego (bezpośredni WF) oraz ślad związany z łańcuchem dostaw (pośredni WF). Bezpośredni ślad to ilość słodkiej wody zużytej lub

zanieczyszczonej przez producenta podczas całego cyklu produkcji. Natomiast pośredni WF to cała słodka woda zużywana lub zanieczyszczana przez dostawców surowców do produkcji, którzy zapewniają wkład produkcyjny dla przedsiębiorstwa [Ibáñez i in. 2017].



Rysunek 1. Schemat produkcji gazpacho (Ibáñez i in. 2017)
Diagram of gazpacho production (Ibáñez et al. 2017)

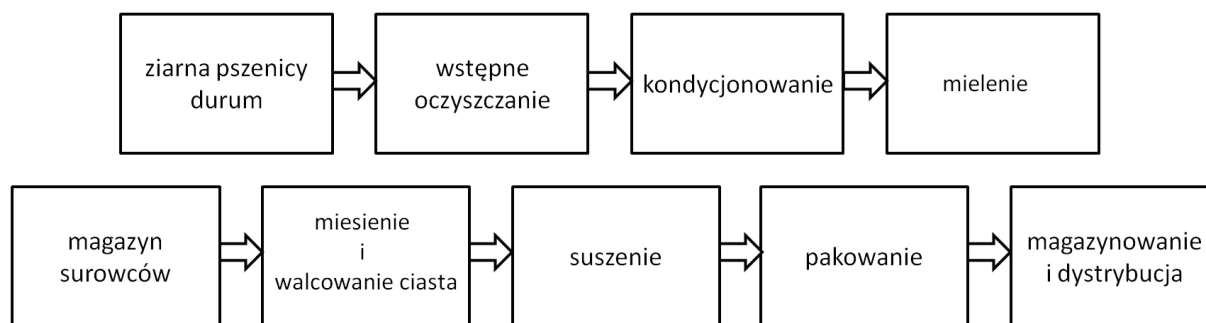
Ślad wodny łańcucha dostaw składa się z dwóch części: WF surowców (pomidor, papryka, ogórek, cebula, czosnek, oliwa z oliwek i ocet) i WF opakowań (pojemnik, materiały do etykietowania, materiał opakowaniowy). Każda z nich określa udział surowców wejściowych w śladzie wodnym produktu finalnego. W celu oszacowania WF zupy został obliczony WF każdego z surowców wejściowych, wyszczególniając następujące ślady: zielony, niebieski i szary.

Wyznaczona całkowita wartość WF dla 1 l gazpacho wynosiła 580,5 l, w tym ślad zielony to 69%, niebieski 23% a szary 8%. W przypadku zupy, ślad wodny operacyjny stanowi niewielki udział w porównaniu ze śladem związanym z łańcuchem dostaw. W konsekwencji tego, zużycie wody do produkcji gazpacho w tej firmie jest bardzo niskie. Dodatkowo, jeśli chodzi o proces produkcyjny udowodniono, że pomimo niskiego udziału

w produkcji oliwy z oliwek stanowi główną składową WF wynikającego z produkcji. Stwierdzono, że największy udział w WF gazpacho ma łańcuch dostaw. W związku z tym gospodarka wodna w przedsiębiorstwie powinna skoncentrować się na ograniczeniu zużycia wody w łańcuchu dostaw, a nie w działalności operacyjnej. Wartość WF zależy od lokalnych warunków produkcji. Zatem precyzyjne określenie śladu wodnego jest możliwe, gdy uzyskamy dokładne informacje lokalne na temat struktury zużycia wody [Ibáñez i in. 2017].

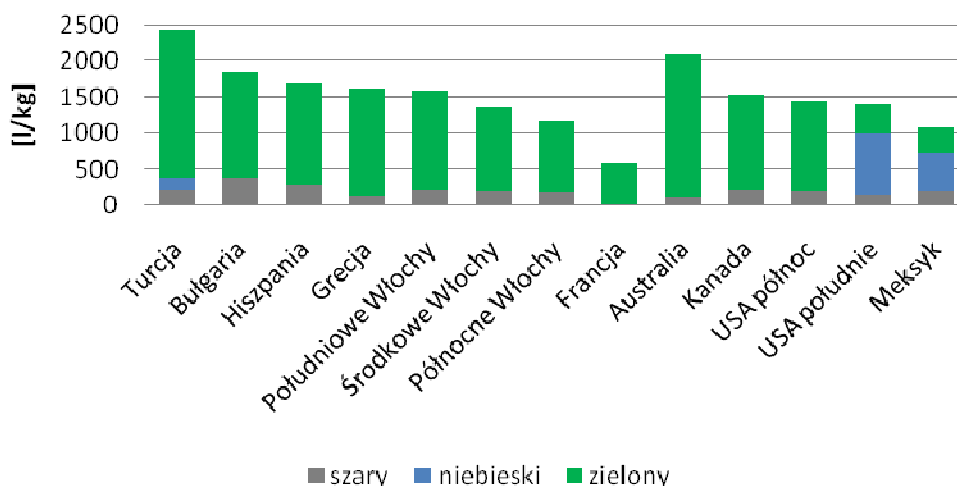
Zainteresowanie wyznaczaniem śladu wodnego gotowych produktów obserwuje się w wielu obszarach przemysłu rolno-spożywczego. Od 2008 roku firma Barilla [Ruini i in. 2013] zaczęła oceniać obciążenia środowiskowe swoich produktów, stosując metodologię oceny cyklu życia (LCA). Ich celem było uwzględnienie całego łańcucha produkcyjnego i zmniejszenie wpływu jego produktów na środowisko naturalne. Badania zostały przeprowadzone w sposób systematyczny, dzięki czemu firma mogła obliczyć i zweryfikować główne wskaźniki wpływu swoich produktów na środowisko. Ich badania w szczególności koncentrowały się na analizie śladu wodnego makaronu z pszenicy durum Barilla oraz wody związanej z handlem pszenicą durum i makaronem.

Ślad środowiskowy produktów był oceniany metodologią LCA, zgodnie z ISO 14040: 2006 (zarządzanie środowiskiem - zasady oceny cyklu życia). Do obliczeń wykorzystano dane emisyjne i dotyczące wykorzystanych zasobów na każdym etapie cyklu produkcyjnego. Ocenę wpływu na środowisko podzielono na szereg kategorii. Zastosowano wiele wskaźników opisujących to oddziaływanie, tj. potencjał globalnego ocieplenia (GWP), ślad wodny, ślad ekologiczny, pierwotne zużycie energii, zakwaszenie ziemi, różnorodność biologiczna itp. Określono ślad wodny jako wykorzystanie zasobów wodnych pod względem ilości wody zużytej i / lub zanieczyszczonej podczas całego łańcucha, od produkcji surowca po konsumpcję wody w towarze lub usługach. W analizie uwzględniono zużycie wody związane z wytwarzaniem dóbr kapitałowych, transportem, wytwarzaniem energii i innymi systemami produkcji energii. Najczęściej, przedsiębiorstwa koncentrują się wyłącznie na zużyciu wody w swoich działaniach, zapominając o łańcuchu dostaw. Natomiast przeprowadzona analiza śladu wodnego w tej firmie odnosiła się do produkcji suszonego makaronu z pszenicy durum we Włoszech, USA, Grecji i Turcji. Ślad wodny obliczono w trzech kolejnych latach. Zakres badawczy obejmował wszystkie działania od uprawy pszenicy po transport produktów do głównych centrów dystrybucyjnych. Wyszczególniono następujące etapy w produkcji makaronu, wpływające na ślad wodny: uprawę, mielenie, przetwarzanie, opakowanie, dystrybucję i gotowanie (rys. 2).



Rysunek 2. Schemat produkcji makaronu [Ruini i in. 2013]
Scheme of pasta production [Ruini et al. 2013]

Uprawa pszenicy durum wiąże się z największym zużyciem wody, uzależnionym od metod gospodarowania nią przez rolników. Ślad wodny w tym etapie obliczono przez pomnożenie WF pszenicy przez całkowitą ilość zakupionej pszenicy durum z czterech krajów (Włoszech, Grecji, Turcji i USA) (rys. 3). Kolejny etap dotyczy mielenia i określa zużycie wody osobno dla każdego młyna. W badaniach uwzględniono energię potrzebną do przetworzenia pszenicy w kaszę manę oraz jej transport do fabryki.



Rysunek 3. Ślad wodny (szary, niebieski, zielony) pszenicy durum w różnych częściach świata [Ruini i in. 2013]
Water footprint (gray, blue, green) of durum wheat in various parts of the world [Ruini et al. 2013]

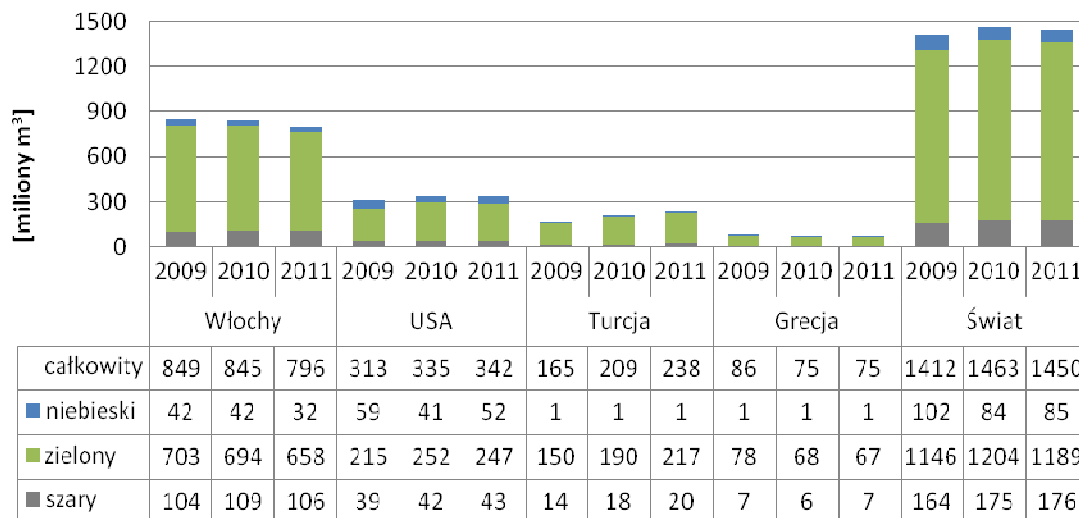
Niebieski ślad wodny obliczono na podstawie ilości kaszy manny pochodzącej z różnych młynów, obecnych w produkcji końcowym. Dodatkowo do tego etapu wliczono ślad wodny pochodzący od zakupionej kaszy manny. W procesie wytwarzania makaronu ślad wodny obliczono jako sumę bezpośredniego zużycia wody podczas produkcji makaronów i pośredniego zużycia wody związanego z energią potrzebną do ich przetwarzania oraz pakowania. Całkowity ślad wodny tego procesu został obliczony poprzez udział każdego

substratu w stosunku do produkcji makaronu. Z kolei ślad wodny opakowania został obliczony z uwzględnieniem pierwszego i drugiego opakowania makaronu (po 500 g). Opakowanie używane do transportu składników luzem zostało wyłączone ze względu na jego niewielki wkład. Ze względu na to, że ślad wodny w dystrybucji makaronu jest znikomy, nie uwzględniono go w obliczaniu całkowitego śladu wodnego. Kolejną składową jest ślad wodny związany z gotowaniem. Jest on drugim, co do wielkości, parametrem wpływającym na ogólny WF makaronu. Ilość wody zużywanej na etapie gotowania jest istotna, zarówno w kategoriach bezpośredniej konsumpcji wody, jak i pośrednich. Niezbędna ilości wody do gotowania makaronu na 500 g produktu to 5 l [Ruini i in. 2013].

Tabela 2. Ślad wodny (całkowity, szary, niebieski, zielony) (l/kg) makaronu z pszenicy durum produkowanego przez firmę Barillę w zależności od kraju i etapu produkcji [Ruini i in. 2013]

Water footprint (total, gray, blue, green) (l/kg) durum wheat pasta produced by Barilla, depending on the country and production stage [Ruini et al. 2013]

kraj	rodzaj śladu wodnego	ślad wodny w procesach jednostkowych [l/kg]						całkowity ślad wodny [l/kg]
		uprawa	milenie	produkcja	pakowanie	gotowanie	suma	
Włochy	zielony	1 105	-	0	0	-	1 105	1 346
	niebieski	47	-	4	2	10	63	
	szary	178	-	0	0	-	178	
USA	zielony	1 146	-	0	0	-	1 146	1 594
	niebieski	237	-	1	2	10	250	
	szary	198	-	0	0	-	198	
Grecja	zielony	1 388	-	0	0	-	1 388	1 546
	niebieski	5	1	2	2	10	20	
	szary	138	-	0	0	-	138	
Turcja	zielony	2 596	-	0	0	-	2 596	2 857
	niebieski	6	-	1	2	10	19	
	szary	242	-	0	0	-	242	



Rysunek 4. Ślad wodny produkcji makaronów Barilla w różnych krajach na przestrzeni 3 lat (2009 – 2011)

The water footprint of the production of Barilla pasta in various countries over three years (2009 - 2011)

Stwierdzono, że największy udział w całkowitym śladzie ma etap uprawy pszenicy [Ruini i in. 2013]. W każdym z analizowanych krajów, zielony ślad wodny jest najwyższy, stanowi ok. 1 100 l/kg (jedynie w Turcji jest wyższy i wynosi 2 600 l/kg) i mieści się w zakresie 72,3 - 91,2% całkowitego śladu wodnego (tab. 2). W przypadku USA, niebieski WF ma największe znaczenie ze względu na wykorzystanie wody z nawadniania i stanowi on ok. 8,6% zielonego śladu. Pozostałe etapy produkcji makaronu mają niewielki wpływ na ślad wodny. Etapy produkcji dotyczące upraw oraz pakowania mają wpływ tylko na niebieski ślad wodny (3 - 6 l na 1 kg makaronu). We wszystkich krajach oprócz USA, szary ślad wodny jest większy niż niebieski i stanowi 16% zielonego śladu wodnego. Całkowity ślad wodny (oprócz etapu gotowania) jest zależny od miejsca produkcji i wynosi odpowiednio 1 336 l/kg dla Włoch, 2 847 l/kg dla Turcji (rys. 4). Jest to spowodowane różnymi warunkami klimatycznymi i technikami rolniczymi w różnych krajach.

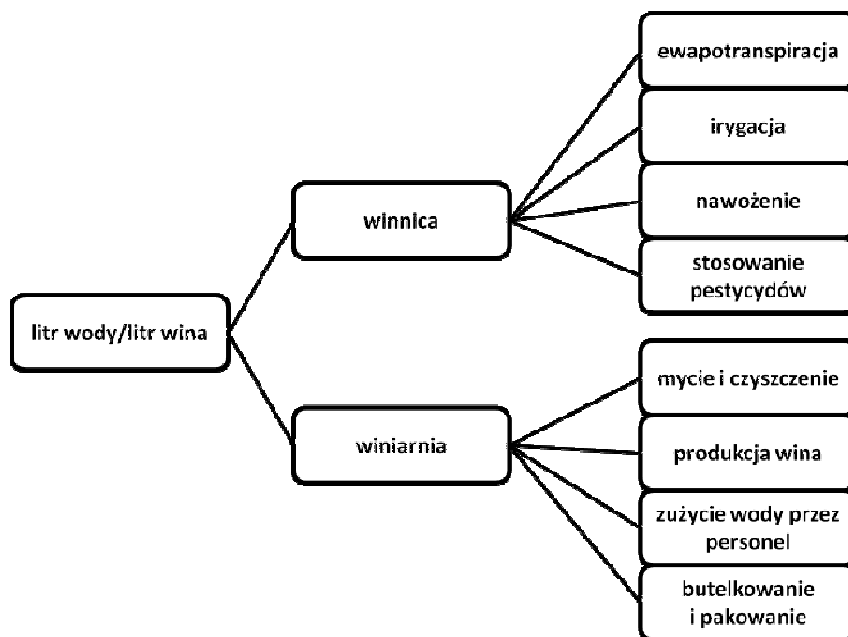
Globalny wpływ produkcji makaronów Barilla w 2011 r. to około 1 450 mln m³ wody (rys. 4). Największą konsumpcję wody wykazują działania we Włoszech - ok. 55%, następnie USA - 23,6%, Turcja - 16,4% i Grecja - 5%. Na podstawie uzyskanych rezultatów przedsiębiorstwo zastosowało konkretne modyfikacje w systemach produkcji w celu ograniczenia zużycia wody. Obniżenie wartości śladu wodnego makaronu jest możliwe poprzez zmianę uprawy surowca. W tym celu, np. we Włoszech wprowadzono nową odmianę wysokiej jakości pszenicy durum (pszenicy Aureo), która odznacza się większą odpornością na niekorzystne warunki wodne. Pozwala to na ograniczenie importu pszenicy na obszary

pustynne południowo-zachodnich Stanów Zjednoczonych, gdzie uprawa wymaga stałego nawadniania. Strategia ta może prowadzić do obniżenia zużycia wody o około 40 mln m³ rocznie. Duża zmienność całkowitego śladu wodnego makaronu dla różnych krajów wskazuje na zależność tego wskaźnika od lokalnych warunków środowiskowych i technik rolniczych przyjętych podczas uprawy pszenicy na danym obszarze. Z tego powodu Barilla zamierza jeszcze bardziej ograniczyć ślad wodny makaronu poprzez promowanie lepszych praktyk rolniczych i wprowadzanie nowych odmian, które mogą ograniczyć stosowanie nawadniania.

ŚLAD WODNY PRZEMYSŁU WINIARSKIEGO

Kolejną branżą mającą duże znaczenie, zarówno w produkcji gospodarczej, jak i na światowym rynku produktów żywnościowych jest przemysł winiarski. To jeden z sektorów mających negatywny wpływ na środowisko. Według Hoekstra i in. [2011] średni ślad wodny kieliszka wina (0,125 l) wynosi 109 l, gdzie: 69,9% stanowi zielony ślad wodny, 15,9% niebieski, 14,3% szary.

W 2011 r. Włoskie Ministerstwo Środowiska zainicjowało działania w celu poprawy stabilności włoskiego sektora wina. W ramach projektu V.I.V.A. (Valutazione Impatto Viticoltura sull'Ambiente) została opracowana nowa metodologia oceny śladu wodnego wina [Lamastra i in. 2014]. Umożliwiła ona również porównywanie różnych win z tej samej winnicy, poprzez obliczenie szarego śladu wodnego, zgodnie z podejściem zaproponowanym przez Hoekstra i in. [2011]. Wpływ zużycia wody w cyklu życia produkcji win gronowych oceniono dla sześciu różnych win pochodzących z tej samej winnicy na Sycylii, Włochy, stosując zarówno nowo opracowaną metodologię (V.I.V.A.), jak i klasyczną metodologię WFN. Praca była punktem wyjścia do opracowania łatwego w użyciu oprogramowania do oceny śladu wodnego produktów winiarskich, obliczanego dla każdego etapu produkcji osobno (rys. 5). Podejście to odzwierciedla zużycie wody wymagane w łańcuchu dostaw i przetwarzaniu, od bezpośredniego zużycia wody przy przetwarzaniu surowca, do zużycia wody przez personel i pośrednie zużycie wody do produkcji energii.



Rysunek 5. Poszczególne etapy procesu produkcji wina [Lamastra i in. 2014]
Individual stages of the wine production process [Lamastra et al. 2014]

Dokonano oceny zielonego, niebieskiego i szarego śladu wodnego na wszystkich etapach produkcyjnych. Zielony ślad wodny jest uzależniony od rzeczywistej zdolności parowania z roślin i dostępności wilgoci w glebie. Oblicza się go codziennie, sumując wszystkie objętości wody deszczowej utraconej przez ewapotranspirację upraw. Z kolei przechwytywanie i perkolacja wody deszczowej przez plony jest codziennie odejmowana od wartości opadów uzyskanych z danych meteorologicznych. Niebieski ślad wodny oblicza się na podstawie danych dotyczących całkowitej ilości wody zużytej w procesie wytwarzania wina. Znając całkowitą ilość zużywanej wody i liczbę produkowanych butelek, można obliczyć średnie zużycie wody na butelkę wyprodukowanego wina. Całkowite zużycie wody, ponadto obejmuje jej wykorzystanie w procesach produkcji wina, jak również wodę pitną dla personelu i wykorzystywaną do celów higienicznych. Wykorzystanie niebieskiego śladu wodnego dotyczy: ilości wody używanej do nawadniania w okresie wegetacji, objętości używanej do rozcieńczania składników aktywnych oraz czyszczenia całego wyposażenia.

W przypadku produkcji win opracowano bardziej szczegółowe obliczanie szarego śladu wodnego, związanego z zanieczyszczeniem wód. We Włoszech prawo wymaga bowiem, aby winiarnie posiadały oczyszczalnię ścieków i odprowadzały ścieki o jakości poniżej określonych norm. Dlatego do tego przypadku dostosowano metodologię liczenia szarego WF uwzględniając różne mechanizmy usuwania zanieczyszczeń pestycydami dla każdego rodzaju wód (gruntowych, powierzchniowych). W pierwszym etapie określono stężenie środowiskowe (PEC) dla każdego rodzaju wody i mechanizmu usuwania zanieczyszczenia.

Następnie, oznaczono toksyczność pestycydu dla wybranych organizmów nie będących przedmiotem zwalczania na podstawie danych ekotoksykologicznych i określono współczynnik rozcieńczenia dla każdego mechanizmu usuwania zanieczyszczenia dla różnych rodzajów wód.

We wszystkich przypadkach zielony ślad wodny produkcji win był największym źródłem WF. Nowa metodologia pozwoliła określić różnice między winoroślami tej samej winnicy i ocenić zanieczyszczenie zbiorników wodnych pestycydami, podczas gdy metodologia WFN uwzględnia jedynie nawożenie. W konsekwencji wykazano wyższy WF winnicy obliczonej przez V.I.V.A., w porównaniu z metodologią WFN. Porównano ślady wodne win produkowanych z winogron z sześciu różnych winnic. Czynniki wpływające na uzyskane wyniki w tej grupie to, m. in. odległość od zbiornika nawadniającego, tempo nawożenia. Metoda V.I.V.A. stanowi ulepszenie obecnych metod oceny śladu wodnego związanych z produkcją wina. Wprowadzone do niej informacje klimatyczne sprawiają, że metoda jest bardziej czuła. Ocena szarego śladu wody bardziej precyzyjnie pokazuje zanieczyszczenie wody. Ogólny wskaźnik śladu wody jest wyraźny w czasoprzestrzeni, a całkowita ilość wody konsumpcyjnej zmienia się w zależności od położenia geograficznego, głównie ze względu na warunki meteorologiczne i ewapotranspirację winogron. Również na ślad wody szarej wpływa usytuowanie winnicy i stosowane nawozy na plantacji winorośli oraz substancje czynne stosowane do zwalczania szkodników i chorób winogron. Metoda ta zapewnia dokładniejsze wyniki, a przyszłe prace na poziomie europejskim pomogą skonsolidować jej zalety w celu oceny śladu wodnego na skalę gospodarstwa.

Mając na celu uzyskanie pełniejszego obrazu oddziaływań środowiskowych przemysłu winiarskiego przeprowadzono badania polegające na wyznaczeniu śladu wodnego i węglowego (CF) wina w zakresie od uprawy do gotowego wyrobu [Bonamente i in. 2016]. Wyznaczono te wskaźniki zgodnie z procedurą określoną w międzynarodowych normach: ISO 14040 (2006), ISO 14046 (2014). Jednostką funkcjonalną była butelka 0,75 l, a badanym produktem czerwone wino pochodzenia włoskiego. Cykl życia produktu podzielono na 11 etapów, pogrupowanych w trzy moduły, zgodnie z dokumentacją dotyczącą kategorii produktów. Obliczono objętość wody zielonej, niebieskiej i szarej dla każdego modułu. Ślad wodny oceniano jako sumę rzeczywistej i wirtualnej objętości wody, a ślad węglowy oceniono za pomocą metodologii IPCC 2013 [Climate Change, 2017]. Dla badanego produktu obliczono całkowitą zawartość WF równą 580 ± 30 l/butelkę i CF równą $1,07 \pm 0,09$ kg CO₂eq/butelkę. Wykazano bezpośrednią zależność między śladem węglowym, a sumą niebieskiego i szarego śladu wodnego (81,24 l/kg CO₂eq). Udział procesu pakowania

i dystrybucji w śladzie wodnym jest największy i wynosi odpowiednio 56,10% i 41,08%. Uzyskane rezultaty są spójne z innymi badaniami dotyczącymi win czerwonych produkowanych na całym świecie [Bonamente i in. 2016].

PODSUMOWANIE

Ślad wodny jest coraz częściej wykorzystywany do powiązania zużycia wody z procesami produkcyjnymi. Rolnictwo jest największym konsumentem słodkiej wody, co stanowi 70% światowej produkcji wody. Uprawy zbóż charakteryzowały się wysoką wartością śladu wodnego szarego. Wyznaczona całkowita wartość parametru WF dla 1 l gazpacho wynosiła 580 l. Dla tego procesu wyróżniono ślad wodny: zielony, niebieski i szary, które wynosiły odpowiednio 69%, 23%, 8% i związane były głównie z łańcuchem dostaw, natomiast udział śladu wodnego operacyjnego był niewielki.

Wartość WF dla produktów mleczarskich odznacza się wysokim poziomem (ok. 700 – 6 000 m³/Mg produktu) zależnym od zawartości tłuszczu i rodzaju produktu. Stwierdzono, że największy udział w całkowitym śladzie wodnym makaronu miał etap uprawy pszenicy. Pozostałe etapy produkcji makaronu miały niewielki wpływ na ślad wodny. Średni ślad wodny szklanki wina (0,125 l) wynosił 109 l, gdzie: 69,9% stanowi zielony ślad wodny, 15,9% niebieski, 14,3% szary.

Podsumowując, wartość śladu wodnego danego produktu rolno-spożywczego różni się w zależności od zakresu badawczego, warunków klimatycznych. Natomiast, w celu właściwego wyznaczenia śladu wodnego dla produktów należy najpierw, na podstawie dostępnych danych technicznych, opracować schemat systemu produkcyjnego. Konieczne są także informacje o każdym z etapów jednostkowych wytwarzania na podstawie rzeczywistego łańcucha produkcyjnego. Wymagane są również szczegółowe informacje na temat wszystkich użytych składników.

Poznanie zależności pomiędzy zużyciem wody a produkcją i wyznaczenie śladu wodnego produktu umożliwi wskazanie kierunków modernizacji procesu w bardziej zrównoważone i bardziej wydajne ekonomicznie technologie w celu racjonalnego wykorzystania zasobów.

PIŚMIENNICTWO

1. Atzori A. S., Canalis C., Dias Francesconi A. H., Pulina G. (2016). A preliminary study on a new approach to estimate water resource allocation: the net footprint applied to animal products. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 8, 50-57

2. Bonamente E., Scrucca F., Rinaldi S., Merico M. C., Asdrubali F., Lamastra L. (2016). Environmental impact of an Italian wine bottle Carbon and Water Footprint Assessment. *Science of the Total Environment*, 560–561, 274–283
3. Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y. (2004). Water footprints of nations. *Faculty of Engineering Technology*, 16, 80
4. Climate Change, (2007). IPCC Fourth Assessment Report. The Physical Science Basis
5. Hoekstra A. Y., Chapagain A. K., Aldaya M. M., Mekonnen M. M. (2011). The water footprint assessment manual: setting the global standard. London: Water Footprint Network. Earthscan Publishing
6. Hoekstra A. Y., Hung P. Q. (2002). Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Water Science & Technology*, 49 (11), 203-209
7. Hoekstra A. Y. (2016). A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. *Ecological Indicators*, 66, 564-573
8. Ibáñez G. R., Molina-Ruíz J. M., Roman-Sánchez M. I., Casas-López J. L. (2017). A corporate water footprint case study: The production of Gazpacho, a chilled vegetable soup. *Water Resources and Industry*, 17, 34-42
9. Lamastra L., Suciú N. A., Novelli E., Trevisan M. (2014). A new approach to assessing the water footprint of wine: An Italian case study. *Science of the Total Environment*, 490, 748-756
10. Liu, W., Guo A. H., Yang Y. F., Lia, X., Zhao M. R., Tillotson Y. W. (2017). Index decomposition analysis of urban crop water footprint. *Ecological Modelling*, 348, 25–32
11. Lovarelli D., Bacenetti J., Fiala M. (2016). Water Footprint of crop productions. A review. *Science of the Total Environment*, 548–54, 236–251
12. Lu Y., Zhang X., Chen S., Shao L., Sun H. (2016). Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: a case study in North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, 116, 71-79
13. Mekonnen M. M., Hoekstra A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15, 401-415
14. Owusu-Sekyere E., Jordaan H., Chouchane H. (2017). Evaluation of water footprint and economic water productivities of dairy products of South Africa. *Ecological Indicator*, 83, 32–40

15. Ruini L., Marino M., Pignatelli S., Laio F., Ridolfi L. (2013). Water footprint of a large-sized food company: The case of Barilla pasta production. *Water Resources and Industry*, 1-2, 7-24
16. Technical conversion factors for agricultural commodities. Food and Agriculture Organization, 2003
17. Vanham D. (2016). Does the water footprint concept provide relevant information to address the water-food-energy-ecosystem nexus? *Ecosystem Services*, 17, 298-307