

Rozwój niskoemisyjnej energetyki wodorowej w przemyśle energetycznym Egiptu z uwzględnieniem znaczenia kolei dla zmian w procesie dywersyfikacji źródeł pozyskiwania energii

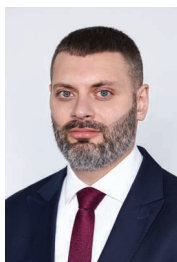
Development of low-emission hydrogen energy in Egypt's energy industry



Patryk Chmielarz

Dr

Uniwersytet Pedagogiczny
im. Komisji Edukacji Narodowej
w Krakowie



Alan Beroud

Mgr inż.

Szybka Kolej Miejska Sp. z o.o.

Streszczenie: Artykuł koncentruje się na analizie jednej z kluczowych dla systemu energetycznego gałęzi jaką jest energia ze źródeł odnawialnych. Autorzy skoncentrowali się na rozważaniach obejmujących egipski sektor energetyczny. Przedstawiono możliwości i ograniczenia egipskiego sektora energetycznego w segmencie energii odnawialnej. Uwaga autorów publikacji została zogniskowana na korzyściach jakie mogą przynieść podpisane przez Egipt umowy o współpracy w aspekcie energetyki wodorowej. Przedstawiono zalety przyjętych rozwiązań w stosunku do kosztów energetyki wodorowej jako istotnej, lecz akceptowalnej wady podjęcia środków sprzyjających zwiększeniu udziału odnawialnych źródeł energii w Egipcie. Dokonano analizy kosztów na przykładach, w oparciu o przewidywania rynkowe. W artykule uwzględniono stałość definiowaną jako trwającą już dwie dekady stabilizację egipskiego sektora energetycznego, co przekłada się na realizację przyjętych planów oraz założeń przez to państwo.

Słowa kluczowe: Energetyka wodorowa; Egipt; Odnawialne źródła energii; Energetyka niskoemisyjna

Abstract: The article focuses on the analysis of one of the key area of the energy system, which is energy from renewable sources. The authors focused on considerations covering the Egyptian energy sector. Possibilities and limitations of the Egyptian energy sector in the renewable energy segment were presented. The attention has been put on the benefits that may occur from the cooperation agreements signed by Egypt in field of hydrogen based energy. The advantages of the solutions taken in opposition to the costs of hydrogen energy were presented as a significant but acceptable disadvantage in terms of the need to take measures to increase the share of renewable energy sources in Egypt. Cost analysis was performed on examples, based on market forecasts. The article takes into account the stability defined as the two decades long stabilization of the Egyptian energy sector, which translates into the implementation of the adopted plans and assumptions by this country.

Keywords: Hydrogen energy; Egypt, Renewable energy sources; Low-emission energy

Wstęp

W ostatnich latach zauważalnym stało się zwiększenie zainteresowania ośrodków naukowych, które reprezentują sektor państwowy, jak również prywatny w obszarze energetyki wodorowej. Implikuje to także zainteresowanie państw będących importerami surowców w ujęciu gospodarczym, jako gałęzi energetycznej potencjalnie opłacalnej i stanowiącej możliwą alternatywę dla innych źródeł energii w kontekście ogólnej tendencji do zmniejszenia do minimum emisyjności będącej w konotacji z sektorem energetycznym. Ze względu na po-

zytywny wydzźwięk przedstawianych przez ekspertów opinii, dotyczących możliwości techniczno-ekonomicznych, energetyka wodorowa stanowi nadzieję dla wielu gospodarek, będąc najlepszą formą zastępczą dla konwencjonalnych, nieodnawialnych źródeł energii. Powyższe dotyczy państw wchodzących w skład Unii Europejskiej, ale także szeregu innych krajów wysokorozwiniętych oraz państw aspirujących do odgrywania coraz większej roli na „geopolitycznej szachownicy”, czego przykładem jest Egipt.

Egipt od 2019 roku zaspokaja swoje potrzeby energetyczne wyłącznie w

oparciu o produkcję krajową (Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, Polska w Egipcie, 2023). W 2022 roku w Egipcie 90,5% energii wytwarzanej pochodziło z gazu ziemnego i ropy naftowej, 7,3% z elektrowni wodnych, a 2,2% ze źródeł odnawialnych (Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, Polska w Egipcie, 2023). Zauważalny jest niski udział źródeł odnawialnych w strukturze energetycznej Egiptu, co nie oznacza braku potencjału tego państwa do zrestrukturyzowania własnego sektora energetycznego, w celu obniżenia emisyjności, jak i ustanowienia swobodnego zabezpieczenia energetycznego, stanowiącego działanie prewen-

cyjne na przyszłość. Egipskie władze zobowiązały się do 2035 roku zwiększyć udział energii pochodzącej z OZE do 42% (Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, Polska w Egipcie, 2023).

W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie ze strony decydentów odpowiedzialnych za funkcjonowanie egipskiego sektora energetycznego zielonym wodorem. Energia produkowana z wodoru należy do jednej z najczystszych form energii, a jednocześnie jest niewyczerpalna, podobnie jak energia ze źródeł odnawialnych czy energia jądrowa (Wiącek, 2011). Przedmiotem niniejszej pracy będzie więc przegląd aspektów energetyki wodorowej w szerszym kontekście, mierzony możliwościami, jak również ograniczeniami egipskiego sektora energetycznego, z uwzględnieniem problematyki infrastrukturalnej, korzyści gospodarczych, koniecznych udoskonaleń technicznych z uwzględnieniem magazynowania i transportu oraz - co szczególnie istotne - zagadnień badawczych mających na celu przystosowanie systemu energetycznego do nowoczesnych technologii. Jedną z szybko rozwijających się branż przemysłowych są przewozy towarowe, osobowe, w tym również kolejowe. Ta ostatnia wykorzystuje coraz częściej nowe technologie, również w obszarze pozyskiwania energii jako źródła napędu składów kolejowych. Wśród nich coraz większe znaczenie odgrywa wodór, który według założeń władz egipskich powinien stanowić w przyszłości podstawowe źródło energetyczne. Biorąc pod uwagę korzyści płynące z energetyki wodorowej możliwym jest przedstawienie hipotezy badawczej stanowiącej, iż

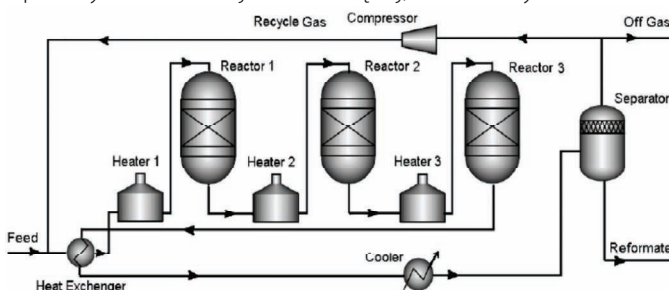
energetyka wodorowa może stanowić szansę dla rozwoju gospodarczego Egiptu, a jej zalety przewyższają wady w postaci konieczności restrukturyzacji technicznych. Zdaniem autorów publikacji pogłębiona analiza tematu, wsparta zagranicznymi opracowaniami mającymi często charakter źródeł pierwotnych pozwoli na potwierdzenie lub obalenie przedstawionej hipotezy oraz ustanowienie tezy będącej merytorycznym zwieńczeniem przedstawionych informacji.

Publikacja powstała w wyniku przeprowadzonych badań naukowych obejmujących kwerendę w obszarze literatury przedmiotowej. Wśród wykorzystanych metod badawczych na uwagę zasługują metody: studium przypadku oraz scenariuszowa. Poprzedzone zostały typową dla nauk o polityce i administracji metodą analizy źródeł zastanych, która stanowi podstawę do zastosowania powyższych metod naukowych. Studium przypadku pozwoliło na wybór kluczowych kwestii poruszonych w artykule naukowym oraz poddanie ich szczegółowej analizie z wykorzystaniem narzędzi o charakterze interdyscyplinarnym celem ostatecznego sformułowania wniosków. Te ostatnie dotyczą przede wszystkim przyszłości, a to umożliwiło autorom artykułu płynne przejście do zastosowania metody scenariuszowej.

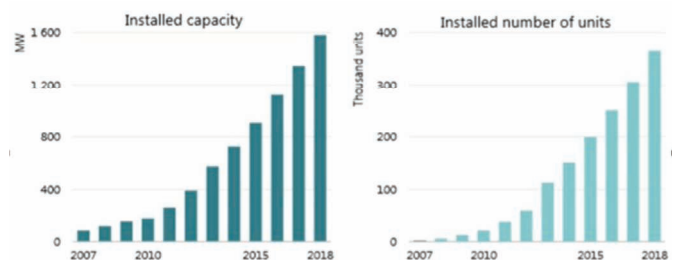
Ogólna charakterystyka energii pozyskiwanej z wodoru, z uwzględnieniem konkurencyjności cenowej tego surowca

Globalna polityka energetyczno-klimatyczna zmusza do szukania alter-

natywnych rozwiązań w obszarze sektora energetycznego celem uzyskania konkurencyjnej i przyjaznej środowisku naturalnego energii elektrycznej (Sikora, 2018). Powszechne jest zatem stosowanie bogatych w wodór gazów z zakładów petrochemicznych oraz hut. Współczesne turbiny gazowe mogą również pracować na mieszance gazów zawierającej wodór, czego przykład stanowi blok o mocy 40 MW w rafinerii w Korei Południowej w Daesan wykorzystujący gazy o zawartości wodoru do 95 %, a okres jej żywotności przy zadanych parametrach jest przewidywany na minimum 20 lat. Brak emisji CO₂ podczas procesu przekształcania wodoru w energię elektryczną i ciepło jest również zaletą konwersji energii wygenerowanej w oparciu o działanie ogniwo paliwowych. Jedynym produktem ubocznym tego procesu jest woda, niestanowiąca potencjalnie szkodliwego dla środowiska czynnika. Ogniwa te mają potencjał do osiągnięcia sprawności energetycznej na poziomie ponad 60%, przy zachowaniu wyższej wydajności, przy obciążeniu niestanowiącym obciążenia pełnego. Stanowi to zaletę w kontekście przeprowadzenia operacji elastycznych np. równoważenia obciążenia (Cire, 2020). Wadą uzyskiwania czystej energii z przemian związków, których składową jest wodór jest koszt pozyskiwania samego wodoru, przewyższający w swej istocie poziom zysków energetycznych, wynikających ze spalania wodoru, przemawiający z kolei na korzyść argumentu o nieopłacalności tego procesu. Jedną z najważniejszych zalet energii pozyskiwanej z wodoru jest bezemisyjność.



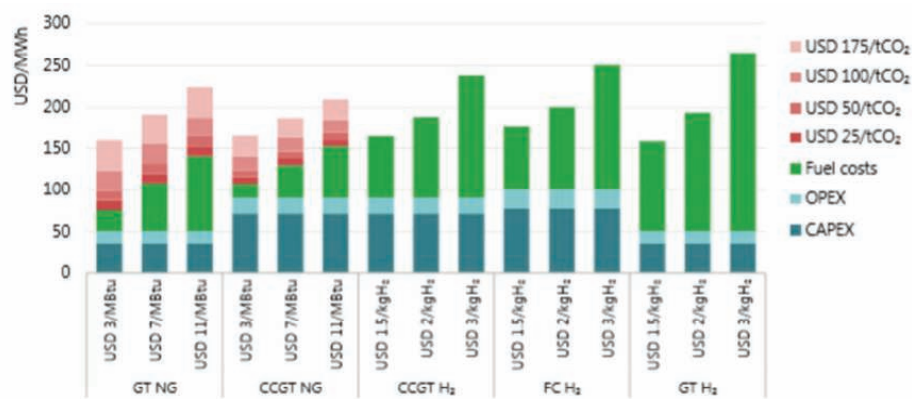
1. Przebieg procesu katalicznego reformingu benzyny ciężkiej. Źródło: https://www.researchgate.net/figure/Process-flow-scheme-of-catalytic-naphtha-reforming_fig1_244749732



2. Rozwój pojemności stacjonarnego ogniwa paliwowego na przestrzeni lat 2007-2018. Źródło: World Energy Outlook 2019 Part of World Energy Outlook, IEA 2019

Głównym produktem wynikającym z tego procesu jest woda w postaci gazowej (para wodna), a więc gaz niestanowiący zagrożenia dla środowiska w przeciwieństwie do dwutlenku węgla oraz dwutlenku siarki, powstających jako produkty spalania konwencjonalnych paliw, których główną składową są węglowodory krótkołańcuchowe, powstałe w skutek procesu krakingu węglowodorów o łańcuchach dłuższych oraz następczego procesu reformingu, zwiększającego stopień rozgałęzienia przedstawionych związków. Implikuje to większą niż w przypadku prostolańcuchowych izomerów łatwość spalania. W tym kontekście warto wspomnieć, że wodór jako gaz posiada relatywnie niską temperaturę zapłonu oraz zaskakująco wysoką wartość opałową, co stanowi argument za wykorzystaniem wodoru jako źródła energii, ponieważ w przeciwieństwie do węglowodorów niekonieczne jest tu przeprowadzanie procesu krakingu i reformingu. Zyski energetyczne są także niebywale wysokie w stosunku do masy molowej tego pierwiastka. Priorytetowe wydają się aspekty magazynowania i przesyłu wodoru na skalę przemysłową oraz optymalizacja procesu jego produkcji (Sikora, 2018).

Przedstawiony na wykresie 2 znaczący wzrost udziału stacjonarnych ogniw paliwowych w całokształcie pozyskiwania energii pokazuje, że zasadnym jest uwzględnienie tego surowca jako alternatywy w obliczu konieczności stałego zmniejszania emisyjności wynikającej ze spalania konwencjonalnych surowców energetycznych, gdzie na czele znajdują się wciąż węgiel oraz gaz ziemny. Wodór jest czystym i elastycznym nośnikiem energii, powstałym z podstawowych źródeł energii, substancji zawierających wodór, takich jak metan i woda lub jako produkt uboczny w zakładach chloroalkalicznych (Maestre, 2021). Aktualnie problemem jest krótsza żywotność techniczna ogniw paliwowych w zestawieniu z turbinami gazowymi oraz mniejsza moc wyjściowa stacjonarnych ogniw paliwowych (do 50 MW dla największych elektrowni, jednostki



3. Ujednoczone koszty wytwarzania energii elektrycznej dla bilansowania obciążenia gazem ziemnym i wodorem.

Legenda: GT - turbina gazowa; CCGT - turbina gazowa o cyklu kombinowanym; FC - ogniwo paliwowe; NG - gaz ziemny. CAPEX - 500 USD/kW GT, 1000 USD/kW CCGT bez CCS i CCGT opalanego wodorem, 1000 USD/kW FC. Sprawności brutto (LHV) - 42% GT, 61% CCGT bez CCS i CCGT opalany wodorem, 55% FC. Ekonomiczny okres użytkowania - 25 lat dla GT i CCGT, 20 lat dla FC. Współczynnik wydajności - 15%.

Źródło: World Energy Outlook 2019 Part of World Energy Outlook, IEA 2019

CCGT mogą osiągnąć moc nawet powyżej 400 MW). Jednak ważnym jest podkreślenie możliwości zagospodarowania dodatkowych zasobów wywodzących się z ubocznej produkcji ciepła, podczas generacji energii elektrycznej, w czasie pracy ogniwa paliwowego. Według prognoz przyszłe obniżki kosztów ogniw paliwowych są zależne od tak zwanego rozwoju technologicznego, czyli m.in. ilości wdrożeń i implikowanych przez nie efektów. Przy założeniu odpowiedniej działalności na rzecz wprowadzenia optymalizacji, CAPEX na wodorowe ogniwo paliwowe mógłby spaść do 425 USD/kW do 2030 roku (Cire, 2020). Paliwa bazujące na substancjach złożonych z atomów wodoru (czysty wodór), jak i składające się także z innych pierwiastków (amoniak) miałyby możliwość zaoferowania elastyczności niskoemisyjnej dla systemów elektroenergetycznych, wprost proporcjonalnej do rosnącego udziału zmiennej energii odnawialnej. Warto podkreślić, że alternatywę dla paliwa wodorowego stanowią elektrownie opalane gazem ziemnym lub biogazem wyposażone w CCUS, ale są one obciążone koniecznością dodatkowej inwestycji w wyposażenie do wychwytywania CO₂, co sprawia, że koszt w przeliczeniu na jednostkę mocy byłby wyższy. Przy założeniu występowania niskiego obciążenia wodór stanowi więc alter-

natywę bezkonkurencyjną względem argumentacji podnoszącej koszty dla gazu ziemnego z CCS oraz biogazu. Zgodnie z wykresem 3 możliwe jest przeprowadzenie wyliczenia zakładającego np. współczynnik obciążenia 15% i cenę gazu ziemnego na poziomie 7 USD/MBtu (1 Btu ≈ 252 cal). W takim przypadku cena za emisję CO₂ powinna być na poziomie 100 USD/t, żeby możliwym było mówienie o konkurencyjności wodoru względem gazu ziemnego, ponieważ w takim powiązaniu wypadkowym cena wytwarzania energii z wodoru wynosiłaby 1,5 USD/kg. Jednak przy wzroście ceny wodoru o 0,5 USD cena emisji CO₂ musiałaby wynosić 175 USD/t, aby możliwym było zachowanie konkurencyjności wodoru względem gazu ziemnego (Cire, 2020).

Osobiście jednak, jako autorzy przedmiotowego artykułu jesteśmy zwolennikami innego sposobu podejścia, co do opłacalności inwestycji w wodór. Zakładając, że traktujemy wodór jako sposób zbilansowania nieprzewidywalności absorpcji przez sieć OZE, przy założeniu kosztów budowy (patrz Tabela nr 1.) siłowni wiatrowej o mocy 1MW w wysokości 1,3 mln euro o współczynniku wydajności 30% (1x0,3x24x365=2628 MWh) koszty przedstawiają się następująco: dla elektrolizera MC 500 NEL o mocy 2,5 MW ilość energii potrzebnej do

Tab. 1. Założenia przyjęte do projektu

	Wartości w tys. PLN			
	Koszt roczny z siłownią	%	Koszt roczny bez siłowni	%
Budowa siłowni wiatrowej 42 mln PLN (amortyzacja)	2.100,0	48,4		0,0
Koszt operacyjny farmy wiatrowej	620,6	14,3	620,6	27,7
Instalacja elektrolizera 16 mln PLN (amortyzacja)	797,6	18,4	797,6	35,6
Koszt operacyjny elektrolizera	798,0	18,4	798,0	35,6
Woda	24,0	0,6	24,0	1,1
Razem koszty	4.340,2	100	2.240,2	100
Założenia				
Okres żywotności instalacji (lata)	20		20	
Roczna produkcja wodoru (tys. kg)	387,9		387,9	
Cena 1 kg wodoru (PLN)	11,19		5,78	
Ilość wodoru potrzebna do przejechania 100 km (kg)	22,5		22,5	
Koszt przejechania 100 km węgiel (PLN)	321,00		321,00	
Koszt przejechania 100 km wodór (PLN)	251,75		130,05	
Ilość km możliwych do przejechania na wytworzonym wodorze rocznie (tys. km)	1 724		1 724	
Oszczędność na zmianie paliwa (tys. PLN)	1.193,8		3.292,0	
Cash Flow roczny na projekcie (tys. PLN)	4.091,4		4.089,6	

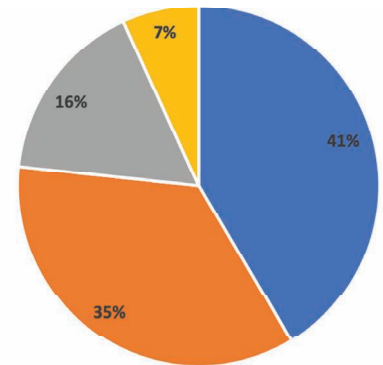
Źródło: opracowanie własne na podstawie badań i doświadczeń własnych A. Beroud

wyprodukowania 1m³ wodoru to 4,53 kWh, maksymalny strumień to 492 m³/h, zapotrzebowanie na energię wynosi więc 2,2 MWh, czyli przy założeniu 30% wydajności siłowni jej moc zainstalowana powinna wynosić 7,33 MW. Koszt jej budowy więc to 42 mln zł, zaś koszt elektrolizera 15 952 tys. zł. Roczny koszt operacyjny farmy wiatrowej zgodnie z BVEF to 19,2 tys. euro za MW, czyli 620,6 tys. zł przy założonej instalacji. Koszt wody to 20 zł za m³, czyli 24 tys. zł rocznie. Obsługa elektrolizera (dane producenta) to 798 tys. zł. rocznie. Przy założeniu więc 20-letniego gwarantowanego przez producenta cyklu żywotności instalacji, graniczna cena wodoru wraz z siłownią to 1,03 zł za m³ wodoru, czyli ok. 11,19 zł za 1 kg wodoru. Jeżeli jednak założyć, że wodór pełni funkcję magazynową dla energii z OZE, która nie może być spożytkowana przez sieć, a więc jej wartość jest równa 0 (z powyższej analizy wyłączylibyśmy koszty siłowni wiatrowej), to cena za 1 m³ wodoru to ok 52 gr. czyli 5,78 zł za 1 kg czystego wodoru. Jako kurs euro dla powyższych obliczeń przyjęto średni kurs Euro z NBP z dnia 01.08.2023, wynoszący 4,41 zł.

Kamienie milowe na drodze do restrukturyzacji sektora energetycznego Egiptu w kierunku centrum energetyki wodorowej

Wodór od dłuższego czasu jest postrzegany jako cenny gaz towarowy i surowiec chemiczny wykorzystywany głównie w rafinacji ropy naftowej i produkcji nawozów. Pomimo aktualności tej kwestii, rząd Egiptu do 2021 roku nie nadawał wysokiego priorytetu rozwojowi źródeł energetyki opartej na wodorze, ze względu na brak planów rozwojowych i brak dostępu do technologii, koszt kapitału (Mostafaepour, 2021). Jednak w sierpniu 2021 roku Siemens Energy i Egyptian Electricity Holding Company (EEHC) podpisały memorandum w sprawie stworzenia przemysłu opartego na wodorze w Egipcie. Siemens Energy i EEHC opracują pilotażowy projekt z elektrolizerem o mocy 100-200 MW, który pomoże we wczesnym wdrożeniu technologii i utworzeniu oraz przetestowaniu środowisk regulacyjnych i certyfikacji, aby umożliwić plany ekspansji (Siemens-energy, 2021). W listopadzie 2022 roku Egipt podpisał osiem umów ramowych w celu opracowania projektów umożliwiających wykorzystanie wodoru i amonia-

ku do produkcji energii, zakładając za cel utworzenie w tym kraju centrum produkcji wodoru i zdobycie 5% światowego rynku do 2040 roku (Reuters, 2022). Umowy podpisane na szczycie klimatycznym COP27 z z AMEA Power, Alfanar, TotalEnergies, Globeleq, EDF, Fortescue Future Industries (FFI), Renew i Scatec koncentrują się wokół portu nad Morzem Czerwonym w Ain Sokhna i Strefie Ekonomicznej Kanału Sueskiego (Reuters, 2022). Strategia przyjęta w Egipcie zakłada wykorzystanie amoniaku oraz metanolu jako głównych źródeł pozyskania wodoru niezbędnych do zapewnienia założonego popytu na ten surowiec. Mogłyby one stanowić paliwa żeglugowe, lotnicze, kolejowe oraz paliwa umożliwiające transport drogowy, umożliwiając przy tym także eksport energii. Jednak już na etapie planowania wykorzystania tego surowca zauważone zostały mankamenty tego rozwiązania w postaci niedoboru wody słodkiej niezbędnej w celu realizacji procesów produkcyjnych. Inną barierą pozostaje odległość (definiowana też w ujęciu przestrzeni) pomiędzy miejscem produkcji zielonego wodoru, a docelowym miejscem jego wykorzystania. Implikuje to wzrost cen transportu wymuszając restrukturyzację sektora transportowego oraz konieczność eksportu wodoru poprzez przystosowane do tego porty morskie. Na szczególną uwagę zasługują umowy, które umożliwiły powołanie do życia Strefy



4. Szacowany sektorowy podział obecnego zużycia wodoru w Egipcie w 2020 roku. Źródło: <https://a9w7k6q9.stackpathcdn.com/wpcms/wp-content/uploads/2021/11/Egypt-Low-Carbon-Hydrogen-Development-Prospects-ET04.pdf>

Ekonomicznej Kanału Sueskiego (wykorzystanie zielonego wodoru) o wartości 8 mld USD. Innym przykładem jest projekt energetyczny w obszarze OZE o nazwie Alfanar, którego wartość jest szacowana na 3,5 mld USD. Alfanar został zrealizowany przez Egipt w kooperacji z Arabią Saudyjską. Jego celem było wytworzenie energii z zielonego amoniaku. Biorąc pod uwagę powyższe osiągnięcia w obszarze OZE trudno nie wyartykułować kilku wniosków. Koniecznym wydaje się zoptymalizowanie kosztów pozyskiwania wodoru, aby zachować konkurencyjność przyjętych rozwiązań. Inną sprawą jest wygenerowanie korzystnego, przemawiającego za wykorzystaniem mimo kosztów procesu wodoru, jako fundamentu transformacji sektora energetycznego w celu zmniejszenia emisji gazów szkodliwych dla środowiska naturalnego. W ramach tak definiowanej polityki European Bank for Reconstruction and Development udzielił pożyczki kapitałowej w wysokości do 80 milionów USD na rzecz Egypt Green Hydrogen S.A.E, mającej na celu zapewnienie rozwoju i eksploatacji pierwszego zakładu produkcji zielonego wodoru w Egipcie (EBRD, 2023). Pożyczka ma na celu wsparcie finansowania zakupu i montażu elektrolizera o mocy 100 MW wraz z powiązanimi obiektami koniecznymi do rozwoju przedstawionego projektu. Odpowiedzialni za pomyślność projektu decydują przy tym możliwą jak największą optymalizację, w celu zmaksymalizowania możliwych pozytywnych skutków wynikających z użytkowania wodoru jako surowca energetycznego.

Elektrolizer zasilany energią odnawialną, będzie wytwarzał zielony wodor, który zastąpi część zużycia wodoru produkowanego z gazu wykorzystywanego przez Egyptian Fertilizer Company i będzie wykorzystywany jako wkład do produkcji zielonego amoniaku. Ten ostatni ma być według przyjętych założeń eksportowany na rynki międzynarodowe (EBRD, 2023). Jest to krok kluczowy, umożliwiający zmierzanie tego kraju w kierunku

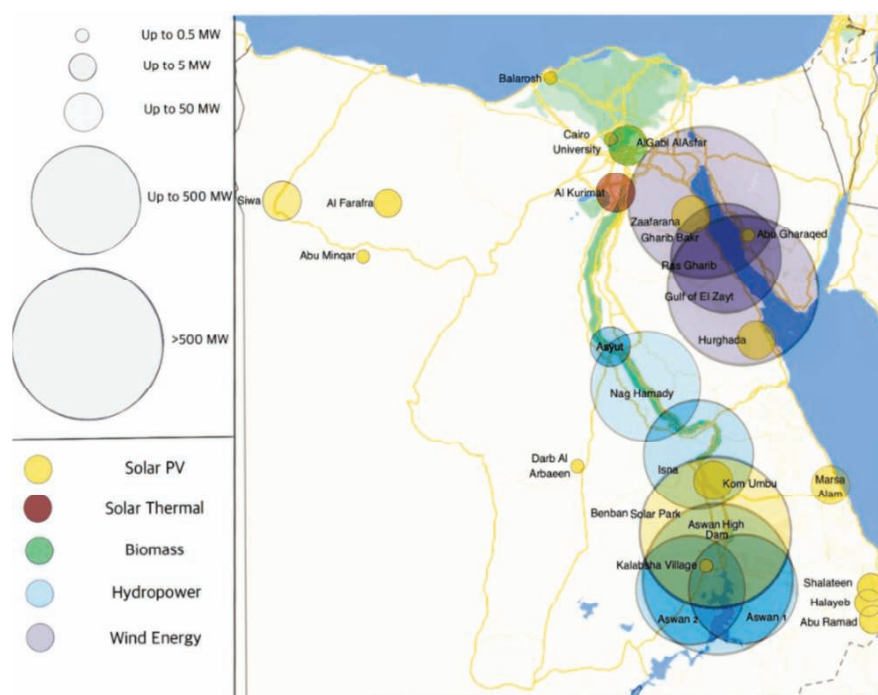
dekarbonizacji kilku gałęzi przemysłu, w szczególności nawozowego - głównego przemysłu, który prowadzi do konsumpcji amoniaku. Będzie to pierwszy tego typu projekt w Egipcie. Jego sukces przyczyni się do lepszej niż dotychczas demonstracji zalet oraz korzyści płynących z eksploatacji takiego rozwiązania, co stanowi swoisty przełom w aspekcie rozwoju zielonego przemysłu wodorowego w Egipcie. Rozwiązanie finansowane poprzez przedstawioną pożyczkę jest całkowicie ekologiczne, ponieważ wspiera budowę elektrolizera, który będzie zasilany energią odnawialną. Rocznie zakładano produkcję zielonego wodoru na poziomie do 15 000 ton, które miałyby zostać sprzedane filii Fertigllobe w Egipcie w celu produkcji zielonego amoniaku, co odpowiadałoby całkowitej oszczędności emisji CO₂ o ponad 130 000 ton rocznie. European Bank for Reconstruction and Development wspiera egipski rząd w opracowywaniu krajowej strategii wodorowej (EBRD, 2023). Otwartym problemem pozostaje wykorzystanie amoniaku w produkcji, odpowiedzialnego za około 1,8 % globalnej emisji dwutlenku węgla (CO₂). Biorąc pod uwagę konieczność redukcji CO₂, ograniczenie zużycia amoniaku musi być bezwzględnie

zredukowane. Zastosowanie zielonego wodoru w procesie produkcji nawozów sztucznych pozwoli zaoszczędzić ponad 130 000 ton emisji CO₂ rocznie (EBRD, 2023).

Zgodnie z wykresem 4 większość wodoru wykorzystywanego w Egipcie była spożytkowana na produkcję nawozów sztucznych, co podkreśla konieczność zmniejszenia udziału wodoru pochodzącego ze spalania gazu ziemnego na rzecz zielonego wodoru, co w konsekwencji znacząco wpłynie na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych, podkreślając powagę przedstawianych planów inwestycyjnych.

Realizacja planów rozwoju wykorzystania energii z wodoru w Egipcie

Na początku marca 2023 roku premier Egiptu Mostafa Madbouly wezwał do szybkiego ogłoszenia pakietu motywacyjnego w celu aktywacji wszystkich uzgodnionych ustaleń i zachęcenia inwestorów do zwiększenia liczby inwestycji w tym sektorze, zgodnie z oświadczeniem gabinetu. Według premiera Mostafa Madbouly Egipt ma potencjał, aby zainstalować około 350 gigawatów energii wiatrowej i około 650 gigawatów mocy w ener-



5. Projektowane miejsca odnawialnych źródeł energii w Egipcie w 2022 roku. Źródło: https://www.researchgate.net/figure/Egypt-s-map-of-the-current-renewable-energy-projects-plants_fig6_36022189

gii słonecznej. Egipt zamierza w nadchodzących latach zmniejszyć emisję dwutlenku węgla, promować wykorzystanie odnawialnych źródeł energii i wykorzystać alternatywne formy energii, w tym zielony wodór, w ramach swojej Narodowej Strategii Klimatycznej 2050. Przewidywania, zgodnie z wcześniejszymi oświadczeniami rządu prognozują możliwość produkcji w Egipcie zielonego wodoru przy najniższych kosztach na świecie za 1,7 USD za kg do 2050 roku, zamiast 2,7 USD za kg w 2025 roku. Umożliwi to przy optymistycznych założeniach wdrożenie ambitnego planu pozyskania 8 procent światowego rynku wodoru, co zostało już wcześniej zapowiedziane przez Egipt. Przedstawiona strategia ma na celu zwiększenie produktu krajowego brutto w Egipcie do 18 miliardów dolarów do 2050 roku, implikując przy tym zwiększenie zatrudnienia i zmniejszenie importu ropy. W ramach rozszerzenia projektów rozwojowych rząd omówił stanowisko umów i protokołów ustaleń podpisanych z wieloma wspomnianymi wcześniej firmami międzynarodowymi, w celu realizacji projektów produkcji zielonego wodoru w Egipcie, osiągnięcia 8% światowego rynku wodoru. Wodór jest sprawdzoną alternatywą dla ograniczenia globalnego ocieplenia i realizacji celów zrównoważonego rozwoju Organizacji Narodów Zjednoczonych. Wprowadzenie rozwiązań hybrydowych na dużą skalę jest rozwiązaniem przyspieszającym niezbędną transformację energetyczną w aspekcie długoterminowym (Ogbonnaya, 2021). Ponadto premier Mostafa Madbouly, podczas spotkania z Mohammedem Shakerem (ministrem energii elektrycznej i energii odnawialnej) i Halą Al-Saeed (ministrem planowania i rozwoju ekonomicznego) podkreślił potrzebę pracy nad zapewnieniem alokacji środków finansowych wymaganych do realizacji ukierunkowanych projektów w celu zapewnienia rozwoju zainicjowanych projektów. Podczas spotkania minister energii elektrycznej dokonał przeglądu działań podjętych przez ministerstwo w tym zakresie.

Egipt: projekt nowoczesnej linii kolejowej kontynuacją zmian na rynku energetycznym

Kiedy w latach 60. ub. stulecia egipskie władze nacjonalizowały rynek produkcji i dystrybucji energii elektrycznej, nikt zapewne nie przypuszczał, że dopiero po upływie niemal sześciu dekad w kraju nad Nilem budowana będzie pierwsza w jego historii zelektryfikowana linia kolejowa. Obecnie przełomowy dla tego północnoafrykańskiego państwa projekt infrastrukturalny znajduje się już w fazie realizacji, a sam rynek energetyczny Egiptu ulega w ostatnich latach sporym przeobrażeniom, coraz częściej stawiając na nowoczesne i ekologiczne rozwiązania.

W ciągu ostatnich kilkunastu lat władze Egiptu konsekwentnie kładły podwaliny pod zrównoważony i ekologiczny rozwój krajowej infrastruktury, oparty przede wszystkim na technologiach przyjaznych dla środowiska. Zrealizowano w tym czasie wiele projektów, obejmujących budowy oraz modernizację dróg, kolei, regulacje rzek, a także unowocześnianie portów lotniczych i morskich. Biorąc pod uwagę fakt, iż sektor transportu odpowiada w tym kraju za 23 proc. całkowitej emisji gazów cieplarnianych, zajmując drugie miejsce po sektorze produkcji energii elektrycznej, projekt budowy zelektryfikowanej kolei, który przez lata dojrzewał, doczekał się w końcu na odpowiedni moment do realizacji.

W latach 2022/23 Islamski Bank Rozwoju (IsDB) zatwierdził kwotę ponad 344 mln USD na sfinansowanie pierwszej fazy projektu Electric Express Train w Egipcie (Egypt Independent, 2023). Zgodnie z opiniami ekspertów cytowanych przez krajowe media, oczekuje się, że realizacja tego ambitnego i przełomowego projektu kolei dużych prędkości, o całkowitej wartości szacowanej na ponad 20 mld USD, pozwoli skorzystać z tego środka transportu 25 milionom ludzi rocznie.

W założeniach przyjętego do realizacji projektu jest zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o około 250 tys. ton w ciągu jednego roku, co stanowi

aż 70 proc. ogólnej emisji CO₂ generowanej przez krajowy transport. Byłoby to więc poważny krok naprzód na drodze do budowy nowoczesnej gospodarki opartej na energii ze źródeł odnawialnych a zarazem odchodzenie od energii produkowanej w oparciu o węglowodory.

Realizacja pierwszej części wspomnianej inwestycji zakłada, że Ain Sokhna nad Morzem Czerwonym oraz Marsa Matrouh i Aleksandria nad Morzem Śródziemnym zostaną połączone linią kolejową o długości 660 km. Egipskie władze oświadczyły w związku z rozpoczęciem realizacji projektu, że będzie on miał znaczący wpływ na poprawę dostępności transportu, gdyż według opublikowanych danych szacunkowych, aż 90 proc. Egipcjan zyska dostęp do komunikacji kolejowej. Projekt ma się też przyczynić do budowy zrjonalizowanej gospodarki energetycznej, nie pomijając jednocześnie aspektu promowania regionalnej integracji gospodarczej, edukacji oraz lepszych możliwości rozwiązywania sytuacji kryzysowych. Warto również dodać, że na tej infrastrukturalnej rewolucji znacząco zyska także egipski rynek turystyczny, będący od wielu lat jednym z wiodących sektorów krajowej ekonomii.

Elektryczny pociąg ekspresowy, w swych założeniach połączy wszystkie prowincje Egiptu. Składał się będzie z trzech linii o łącznej długości ok. 2 tys. km, z 60 stacjami. Jako pierwsza realizowana będzie linia biegnąca z Ain Sukhna do Hadayek, Aleksandrii, El Alamein i Marsa Matrouh. Łączna jej długość wyniesie 660 km, a przebiegać będzie przez 22 stacje. Druga oraz trzecia linia, o łącznej długości ok. 1400 km i z 35 stacjami, pobiegnie od stacji Hayadek do miasta Fayoum/Beni Suef-Abu Simbel, gdzie wybudowane będą trzy stacje na 225 kilometrach trasy, przy średniej odległości ok. 50-80 km między poszczególnymi przystankami (Rynek Kolejowy, 2022). Zgodnie z założeniami projektu, pociągi mają poruszać się po nowych trasach z maksymalną prędkością wynoszącą nawet do 230 km/h. Głównymi roz-

grywającymi tego wielkiego przedsięwzięcia, oprócz egipskiego rządu oraz Islamskiego Banku Rozwoju (IsDB), będą Deutsche Bahn (DB), we współpracy z konsorcjum Siemens Mobility. Odpowiednie dokumenty oraz umowy podpisane zostały przez uczestniczące strony w listopadzie 2022 roku, w egipskim kurorcie Sharm El-Sheik, w ramach konferencji COP27, będącej jednocześnie 27. Konferencją Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatycznych. Wedle podjętych ustaleń, Siemens zbuduje infrastrukturę kolejową, a także dostarczy pociągi pasażerskie i towarowe. Ma także odpowiadać za realizację systemów kolejowych oraz sieci zasilających, elektrycznych i pneumatycznych, jak również dostarczyć rozwiązania dotyczące sygnalizacji, łączności oraz sterowania. Z kolei egipskie Ministerstwo Transportu, reprezentowane przez Krajowy Urząd ds. Tuneli, podpisało umowę na realizację nowej sieci z konsorcjum Deutsche Bahn (DB) i egipską firmę z sektora prywatnego, El-Sewedi Electric.

Według specjalistów niemieckiego producenta pociągów, realizowana w północnej Afryce inwestycja kolejowa będzie szóstym co do wielkości przedsięwzięciem tego typu na świecie. Ten przyjazny dla środowiska projekt infrastrukturalny jest w ich opinii najbardziej znaczącą częścią wysiłków podejmowanych przez władze Egiptu na rzecz przeciwdziałania skutkom zmian klimatu. Pierwsze pociągi mają ruszyć po nowych trasach już w 2025 roku.

Tab. 2. Ocena opłacalności inwestycji

	Wskaźnik	Wartość	Interpretacja wskaźnika
Metody proste	Prosta stopa zwrotu dla kapitału ogółem	25,6%	Osiągnięte wyniki w tej grupie wskazują, że inwestycja zwróci się w okresie niespełna 4 lat.
	Prosty okres zwrotu	47 m-cy	
Metody dyskontowe	Wartość bieżąca netto WBN/NPV (PLN)	18 817,07	NPV wyliczono, dla współczynnika dyskontowego 10% i okresu 20 lat. Uzyskana wielkość oznacza, że projekt jest efektywny z punktu widzenia ekonomicznego. Rentowność jest wyższa od przyjętej krańcowej (10%), projekt może być więc realizowany.
	Wewnętrzna stopa zwrotu WSZ/IRR	25,28%	Projekt jest rentowny i powinien zostać zrealizowany. W okresie 20 lat zapewni średnioroczną 25,3% stopę zwrotu.

Źródło: opracowanie własne

Założenia projektu wykorzystania OZE w polskim sektorze kolejowym z uwzględnieniem doświadczeń egipskiego sektora kolejowego

Zaprezentowany poniżej projekt (w ujęciu tabeli, wykresu oraz komentarza) odnosi się do możliwości wykorzystania OZE w systemie przewozów osobowych przy wykorzystaniu sektora kolejowego. Biorąc pod uwagę egipskie jak również europejskie doświadczenia w tym względzie (koleje niemieckie) należy stwierdzić, iż przyszłość ruchu kolejowego opierać się będzie na nowych nośnikach energetycznych. Poddane zostały podstawowe kryteria i parametry pozwalające ocenić nam ekonomiczność zaprezentowanego (szkicowo) projektu uwzględniając zdaniem autorów najważniejsze zmienne.

Dla wybranego wariantu, który zakłada pominięcie w projekcji kosztów budowy siłowni wiatrowej, przygotowano analizę finansową według zamieszczonego na rysunku 6 schematu.

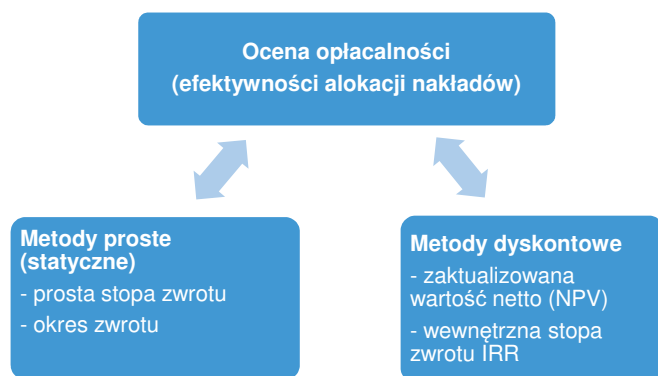
Wyniki analizy zamieszczono w tabeli 2. Analizowany model projektu charakteryzuje się bardzo korzystnymi

parametrami efektywności ekonomicznej. W szczególności jest to efektem założenia, iż prąd wykorzystywany do produkcji wodoru otrzymywany jest z nadwyżki, która nie może być odebrana przez sieć. Projekt natomiast, obciążony jest kosztem operacyjnym obsługi elektrowni wiatrowej odpowiadającym zainstalowanej mocy 7,33 MW. W analizie celowo pominięto koszt zakupu taboru napędzanego wodorem, uznając go za nieistotny dla badanego modelu.

Nic dziwnego zatem, iż egipcjacy decydenci stawiają na wodór jako paliwo przyszłości. Zdaniem autorów niniejszego artykułu stosunek powyższych kosztów stanowi o braku racjonalności i to już w dającej się przewidzieć przyszłości dalszej eksploatacji kolei egipskiej w oparciu o elektryczną sieć trakcyjną. Bardziej racjonalne wydawałoby się tu wykorzystanie i modernizacja istniejącej infrastruktury. Zauważyć również należy, że technologia elektrolizy wodoru, jak i dostępność taboru wodorowego jest domeną państw zachodu, a zcentralizowane układy konwencjonalne wspierać będą tymczasem wzrost i tak już silnych wpływów rosyjskich i umacnianie się takich na kontynencie afrykańskim

Podsumowanie

Wodór jako surowiec niezaprzeczalnie stanowi szansę na rozwój gospodarczy Egiptu. Co więcej w ubiegłych latach wdrożone plany były sukcesywnie realizowane. Pomimo istniejącej problematyki związanej z kalkulacją kosztów oraz przewagi w aspekcie finansowym tego rozwiązania niezaprzeczalnie jest to rozwiązanie ko-



6. Metody zastosowane do badania efektywności projektu. Źródło: opracowanie własne

nieczne w kontekście przymusu zastosowania bezemisyjnych źródeł energii. Zrównoważony rozwój, poprzez efektywne zarządzanie zasobami energii jest ważnym filarem czystszej produkcji i wyznacza drogę do osiągnięcia celu NET ZERO. Egipt pozostaje w tyle za wieloma innymi krajami we wdrażaniu technologii energii odnawialnej. W globalnym rankingu do 2021 roku zajmuje trzydzieste pierwsze miejsce pod względem wykorzystania energii słonecznej. Wykorzystanie bioenergii, geotermii, energii fal i energii jądrowej stanowi zaledwie 0,16% całkowitej produkcji energii elektrycznej w Egipcie chociaż potencjalne możliwości egipskiego sektora energetycznego są w tym obszarze znacznie większe (Salah 2022). Energia pochodząca z zielonego wodoru jest zatem rozwiązaniem optymalnym dla rozwoju sektora energii odnawialnej w Egipcie, stanowiąc szansę rozwoju gospodarczego, jak i zmiany udziału energii odnawialnej w Egipcie na korzystniejszą dla tego Państwa, jak i wymiernych korzyści międzynarodowych. Należy też zauważyć, że brak pełnej elektryfikacji kolei w Egipcie jest dodatkową szansą na rozwój tego sektora w oparciu o wodór produkowany wyspowo.

Znajduje to również przełożenie na funkcjonowanie środków transportu, w tym również analizowanych przez autorów tej publikacji egipskich kolei. Trzeba bowiem zaznaczyć, iż zastosowanie wodoru wyszło już dawno poza sferę prac studyjnych przechodząc do konkretnych rozwiązań znajdujących przełożenie w różnych branżach przemysłu, ale i rozbudowanej w państwach wysokorozwiniętych sfery usług. Zgodnie z tezą, którą została postawiona w artykule Praktyczne wykorzystanie wodoru jako strategicznego nośnika energii na przykładzie sektora kolejowego (Przegląd komunikacyjny, 2023) pociąg wodorowy typu Coradia iLint Alstom zużywa 22,5 kg wodoru na 100 km, natomiast klasyczny elektryczny zespół trakcyjny (EZT) przy założeniu generacji energii z węgla - 322 kg węgla na 100 km. Koszt paliwa do przejechania 100 km (założona cena

węgla 996,60 zł za tonę) przez pociąg korzystający z trakcji elektrycznej to 321 zł. Z kolei, gdy przyjmiemy koszt wodoru, w oparciu o wyliczenia zawarte w tym artykule (5,78 zł x 22,5kg) koszt paliwa potrzebnego do pokonania 100 km wyniesie 130,05 zł. Poczynione założenia i wyliczenia zawarto w tabeli nr 1. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Maestre, V., Ortiz, A., Ortiz, I., 2021. Challenges and prospects of renewable hydrogen-based strategies for full decarbonization of stationary power applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 152, 111628. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111628>.
- [2] Mostafaeipour, A., Hosseini Dehshiri, S.S., Hosseini Dehshiri, S.J., Almutairi, K., Taher, R., Issakhov, A., Techato, K., 2021. A thorough analysis of renewable hydrogen projects development in Uzbekistan using MCDM methods. *Int. J. Hydrogen Energy* 46, 31174–31190. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.046>.
- [3] Ogbonnaya, C., Abeykoon, C., Nasser, A., Turan, A., Ume, C.S., 2021. Prospects of integrated photovoltaic-fuel cell systems in a hydrogen economy: a comprehensive review. *Energies* 14. <https://doi.org/10.3390/en14206827>.
- [4] Wiącek D., Wodór jako paliwo przyszłości, 2011
- [5] Kaj S., Rosja w Afryce- Na marginesie wojny rosyjsko-ukraińskiej, zeszyty historyczne Młoda Wieś, nr.8, marzec 2023.
- [6] Dina Mohamed Yousri - "The Egyptian Electricity Market: Designing a Prudent Peak Load Pricing System"
- [7] Montaser, Wessam, Alaboudy, Elbaset - "Fuzzy Logic Controlled Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement of an Egyptian Electrical Network-Connected Wind Energy System"
- [8] Egyptian Electricity Holding Company Annual Report 2020/2021

[9] Ahram Online

[10] Fast Company Middle East

[11] Beroud A., Praktyczne wykorzystanie wodoru jako strategicznego nośnika energii na przykładzie sektora kolejowego, Przegląd komunikacyjny nr 1/2023, Warszawa 2023

Strony internetowe:

- [1] <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-to-explore-potential-for-green-hydrogen-production-in-egypt.html>
- [2] <https://www.cire.pl/artykuly/materialy-problemowe/1-54373-wodor-do-wytwarzania-i-magazynowania-energii-elektrycznej>
- [3] <https://www.dw.com/en/hydrogen-economy-egypt-to-announce-ambitious-h2-strategy/a-63466879>
- [4] <https://www.ebrd.com/news/2022/ebird-supports-first-green-hydrogen-facility-in-egypt.html>
- [5] <https://www.ebrd.com/work-with-us/projects/psd/53558.html>
- [6] <https://english.ahram.org.eg/NewsContent/3/16/490974/Business/Energy/Egypt-to-announce-package-of-incentives-for-green.aspx>
- [7] <https://www.globalconstructionreview.com/china-energy-to-build-5-1bn-green-hydrogen-plant-in-egypt/>
- [8] Reuters, Egipt podpisuje umowy ramowe w celu uruchomienia przemysłu wodorowego, 2022
- [9] Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, Polska w Egipcie, 2023
- [10] <https://egyptindependent.com/isdb-approves-344-5-mln-for-egypts-electric-express-train/>
- [11] <https://www.rynek-kolejowy.pl/mobile/gigantyczny-kontrakt-siemensa-w-egipcie-stal-sie-trzyrazy-wiekszy-108315.html>