

ENVIRONMENTAL PROCESSES

ISSN 1644-0765

DOI: http://dx.doi.org/10.15576/ASP.FC/188747

ORIGINAL PAPER

Accepted: 15.05.2024

OCENA WYKORZYSTANIA INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ W OKRESIE JESIENNO-ZIMOWYM W ASPEKCIE ZMIANY KLIMATU

Paulina Stanek¹ (▶ 0000-0002-4494-9694, Jacek Leśny^{⊠1} (▶ 0000-0002-0681-6225, Leszek Kuchar¹ (▶ 0000-0002-4157-0910, Ewa Broszkiewicz-Suwaj² (▶ 0000-0001-9346-0118)

¹ Katedra Zastosowań Matematyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, ul. Norwida 25, 50-375 Wrocław

² Katedra Badań Operacyjnych i Inteligencji Biznesowej, Politechnika Wrocławska, wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ABSTRAKT

Cel pracy

W obliczu nieuchronnej zmiany klimatu oraz wysokiego zapotrzebowania na energię w okresie grzewczym (październik-marzec) podjęto próbę oszacowania zmiany dostępnego promieniowania całkowitego w perspektywie 60 lat (2000–2060)

Materiał i metody

Do szacowania promieniowania wykorzystano 5 wzorów opartych na standardowych danych meteorologicznych (temperatura, opad), dla których parametry wyznaczono na podstawie rzeczywistych obserwacji pochodzących z Wrocławia, który jest dobrym przykładem południowej, nizinnej części Polski. Wartości opadu i temperatury dla roku 2060 i scenariusza RCP 6.0 oraz tła (roku 2000) uzyskano przy pomocy generatora danych meteorologicznych WGENK.

Wyniki i wnioski

Uzyskane rezultaty wskazują, że przy spodziewanym wzroście temperatury i opadów, promieniowanie całkowite może zmniejszyć się o 5% w okresie październik–marzec w roku 2060 w porównaniu do roku referencyjnego 2000.

Słowa kluczowe: Representative Concentration Pathways (RCPs), zmiana klimatu, dzienne promieniowanie całkowite

WPROWADZENIE

Warunki panujące wewnątrz budynków zależą od bardzo dużej liczby czynników charakteryzujących sam budynek i jego chwilowe wykorzystanie (liczba osób w pomieszczeniach, ich zachowania, rodzaj pomieszczeń itp.), jednak w istotny sposób zależą też od warunków zewnętrznych (Chen i in., 2020). Jest oczywiste, że kluczowa będzie temperatura powietrza i prędkość wiatru, jednak znaczenie będzie miało też promieniowanie słoneczne, które najlepiej scharakteryzować wykorzystywanym w meteorologii promieniowaniem całkowitym (Molga, 1986), czyli ilością energii promieniowania krótkofalowego padającego na powierzchnię poziomą podawaną jako wartość średnia gęstości promieniowania [W/m²] lub suma energii [MJ] w określonym przedziale czasu. W przypadku budynków mieszkalnych możemy je wykorzystywać na cztery niekolidujące ze sobą sposoby: wytwarzanie prądu za pomocą paneli fotowoltaicznych,

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2024

[™]e-mail: jacek.lesny@upwr.edu.pl

ogrzewanie wody za pomocą kolektorów słonecznych cieplnych (Sowa, 2020), wstępne ogrzewanie powietrza wentylacyjnego za pomocą kolektorów powietrznych (Leśny i in., 2015, 2018) i bezpośrednie ogrzewanie i doświetlanie wnętrza domu za pomocą okien o dodatnim bilansie promieniowania (Sowa, 2018; Wang i in., 2023).

Obecnie w Europie Środkowej, w szczególności w Polsce, olbrzymią popularność zdobyły instalacje fotowoltaiczne. Jest to skutek programów rządowych wspierających tę technologię. W ich rezultacie na koniec marca 2023 moc zainstalowanej fotowoltaiki w Polsce przekroczyła 13 GW (z czego 12,5 GW to niezależne elektrownie PV). Natomiast na koniec grudnia 2023 było to już 17 GW (z czego 15,9 GW to niezależne elektrownie PV), co stanowiło prawie 60% mocy zainstalowanej OZE. Wartość ta ciągle rośnie – moc instalacji solarnych wzrosła o 40% w porównaniu do grudnia 2022 (www.rynekelektryczny.pl).

Jak wspomniano, bardzo ważny udział w tym procesie miały państwowe i samorządowe dofinansowania do instalacji PV oraz (a może przede wszystkim) spodziewane wzrosty cen energii elektrycznej, które przekonały do zmian w swoich gospodarstwach również mniej zamożne osoby. Niestety ten lawinowy wzrost liczby instalacji nie szedł w parze z rozwojem sieci elektroenergetycznych, które okazały się zbyt mało wydajne, aby przyjąć i rozprowadzić lokalnie produkowaną energię na większe obszary. W rezultacie w lokalnych sieciach w chwilach intensywnego promieniowania napięcie rośnie ponad dopuszczalny poziom i sterowniki automatycznie odłączają instalacje fotowoltaiczne. Tak już się dzieje i w najbliższych latach będzie zdarzało się coraz częściej, gdyż ciągle montowane są nowe instalacje.

Trzy pozostałe sposoby są właściwie wykorzystywane sporadycznie, najczęściej są to kolektory do ogrzewania wody, ogrzewanie powietrza wentylacyjnego to raczej nowinka techniczna, natomiast bezpośrednie ogrzewanie wnętrza domu zachodzi w każdym domu o oknach zwróconych na południe, ale aby miało istotne znaczenie w bilansie energetycznym, musi być to w domach wybudowanych w standardzie co najmniej bliskim pasywnemu, co ciągle jest w Polsce dość rzadkie.

Okres jesienno-zimowy w Polsce charakteryzuje się zdecydowanie większym zapotrzebowaniem energetycznym niż okres letni, przy jednocześnie znacznie mniejszej podaży energii pochodzącej z promieniowania. W związku z powyższym pozyskana w tym czasie energia ma większą wartość. Rozważając tę sytuację, można przypuszczać, że obecnie postępująca rozbudowa instalacji fotowoltaicznych dość łatwo doprowadzi do sytuacji, iż w okresie letnim uzyskiwanej energii może być zbyt dużo przy niestety ciągle spodziewanych niedoborach w okresie jesienno-zimowym. Biorąc to pod uwagę, szczególnie interesujące wydaje się pytanie: Czy wraz z postępującą zmianą klimatu wartość promieniowania całkowitego zmieni się w przyszłości dla okresu grzewczego, rozumianego jako okres od października do marca?

METODYKA

W pracy skupiono się na danych pochodzących z Wrocławia (leżącego w południowo-zachodniej części Polski), którego położenie sprawia, że jest reprezentatywny dla większości obszaru południowej części Polski (ryc. 1). Przy czym północna część Polski ma roczną sumę promieniowania niewiele niższą, mniej niż 5%. Ta duża jednorodność terenu Polski pod względem promieniowania (Jerez i in., 2015) wynika z ukształtowania fizycznego – większość obszaru to równinne niziny, a obserwowana zmienność wynika z oczywistej równoleżnikowej zmienności promieniowania z niewielkim wpływem klimatu polarno--morskiego w północno-zachodniej i kontynentalnego w południowo-wschodniej części kraju. Bardzo podobnie będzie na terenach położonych na wschodzie, inne warunki mogą panować na zachodzie z uwagi na bardziej urozmaiconą rzeźbę terenu i większy wpływ cyrkulacji znad Atlantyku na panujące warunki.

Praca powstała w kilku etapach. W pierwszej kolejności przygotowano wzory szacowania promieniowania całkowitego na podstawie zebranych danych dla Wrocławia. Następnie wygenerowano dane meteorologiczne dla horyzontu 2060 roku dla scenariusza klimatycznego RCP6.0 (IPCC, 2013) oraz okresu referencyjnego (rok 2000) za pomocą modelu WGENK (Kuchar, 2004). W ostatnim kroku zastosowano wzory szacowania do danych generowanych w celu poznania wpływu zmiany klimatu na odczyty promieniowania całkowitego.



Ryc. 1. Promieniowanie całkowite w Polsce, 1 kWh/m² = 3.6 MJ/m² (źródło: The World Bank Source 2019. Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data Solargis)

Fig. 1. Global horizontal irradiation in Poland, 1 kWh/m² = 3.6 MJ/m^2 (source: The World Bank Source 2019. Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data Solargis)

Wzory szacowania promieniowania całkowitego

Zastosowane wzory szacowania promieniowania całkowitego (tab. 1) wykorzystują standardowe dane meteorologiczne: temperaturę (głównie dobową amplitudę) oraz opad. Ta metoda pozwala dobrze oszacować promieniowanie całkowite, co zostało potwierdzone w wielu opracowaniach (Hunt i in., 1998; Wu i in.; 2007; Kuchar i in., 2014; Stanek i in., 2018). Tego rodzaju wzory są często używane w skali globalnej (Woli i Paz, 2012; Fan i in., 2018; Uçkan i Khudhur, 2022, Qiu i in., 2022; Karaca i in., 2023; Xing i in., 2023).

Mimo że w literaturze przedmiotu istnieje wiele metod szacowania promieniowania, np. na podstawie zachmurzenia, decyzja o wyborze wzoru wykorzystującego jedynie temperaturę i opad ma swoje uzasadnienie – jako najbardziej powszechne i dostępne dane. W następnym kroku wzory szacowania promieniowania całkowitego (tab. 1) zastosowano do danych meteorologicznych wygenerowanych przy pomocy modelu WGENK.

Dane meteorologiczne uzyskane z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowego Instytutu Badawczego obejmują okres 10-letni, od 2001 do 2010 roku. Na podstawie dobowych danych z Wrocławia (temperatura minimalna, temperatura maksymalna, opad) oraz dobowych danych z Legnicy (promieniowanie całkowite) obliczono współczynniki dla pięciu wzorów szacowania. Promieniowanie pochodziło z Legnicy, ale jest to lokalizacja na tyle bliska, że nie wpływa to znacząco na wzory szacowania dla Wrocławia, a szczególnie na badanie zmiany promieniowania w czasie. Dla każdego miesiąca wielolecia (październik–marzec) przygotowano osobny zestaw współczynników (tab. 2–6).

Tabela 1. Zestawienie wykorzystanych wzorów szacowania promieniowania całkowitego (źródło: Hunt i in., 1998; Wu i in.; 2007; Kuchar i in., 2014; Stanek i in., 2018)

Table 1. List of used formulas for estimating total radiation (source: Hunt et al., 1998; Wu et al., 2007; Kuchar et al., 2014; Stanek et al., 2018)

	Nazwa Name	Wzór Formulae
1	Hunt et al.	$SR = aSR_0 (T_{\max} - T_{\min})^{\frac{1}{2}} + bT_{\max} + cP + dP^2 + e$
2	Hunt et al. – modified	$SR = aSR_0(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{\frac{1}{2}} + bT_{\text{max}} + cP + + e$
3	Wu et al.	$SR = SR_0 \left(a + b(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{\frac{1}{2}} + cT_{avg} + dR \right)$
4	Kuchar et al.	$SR = SR_0 \left(a(T_{\max} - T_{\min})^{\frac{1}{2}} + bR\ln(1 + T_{\max} - T_{\min}) + c \right) + dP + eT_{\max}$
5	combined	$SR = SR_0 \left[a + b(T_{\max} - T_{\min})^{\frac{1}{2}} + cT_{avg} + dR + eP + fT_{\max} + g\Delta T \right]$

gdzie: *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g* – stałe, *SR* – dobowe promieniowanie całkowite [MJm⁻²], *SR*₀ – promieniowanie na granicy atmosfery [MJm⁻²], *T*_{max} – dobowe maksimum temperatury [°C], *T*_{min} – dobowe minimum temperatury [°C], *T*_{min(d+1)} – dobowe minimum temperatury w kolejnym dniu (°C), *P* – opady dobowe (mm), *R* – 1 gdy wystąpił opad, 0 gdy nie wystąpił, $T_{avg} = \frac{(T_{max} + T_{min})}{2}$, $\Delta T = T_{max} - \frac{[T_{min} + T_{min(d+1)}]}{2}$.

where: *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g* – constants, *SR* – diurnal radiation totals $[MJm^{-2}]$, *SR*₀ – extraterrestrial solar radiation $[MJm^{-2}]$, T_{max} – diurnal maximum temperature [°C], T_{min} – diurnal minimum temperature [°C], T_{min} – diurnal minimum temperature [°C], T_{min} – diurnal minimum temperature [°C], $T_{min(d+1)}$ – diurnal minimum temperature of the next day (°C), *P* – diurnal precipitation totals (mm), *R* – binary variable: "did a precipitation phenomenon occur", $T_{avg} = \frac{(T_{max} + T_{min})}{2}$, $\Delta T = T_{max} - \frac{[T_{min(d+1)}]}{2}$.

Miesiąc Month	а	b	с	d	e
Październik October	0,155	-0,018	-0,602	0,024	-0,247
Listopad November	0,126	-0,028	-0,311	0,010	0,566
Grudzień December	0,132	-0,018	-0,261	0,012	0,207
Styczeń January	0,130	-0,021	-0,459	0,029	0,795
Luty February	0,172	-0,069	-0,559	0,025	0,104
Marzec March	0,183	-0,218	-0,764	0,028	0,348

_

Tabela 2. Wzór 1 – zestawienie obliczonych współczynników (źródło: opracowanie własne) **Table 2.** Formula 1 – summary of calculated coefficients (source: own study)

Tabela 3. Wzór 2 – zestawienie obliczonych współczynników (źródło: opracowanie własne) **Tabela 4.** Wzór 3 – zestawienie obliczonych współczynników (źródło: opracowanie własne)

Table 3. Formula 2 – summary of calculated coefficients (źródło: own study)

Table 4. Formula 3 – summary of calculated coefficients (source: own study)

Miesiąc Month	а	b	с	d
Październik October	0,160	-0,019	-0,298	-0,604
Listopad November	0,128	-0,027	-0,175	0,419
Grudzień December	0,134	-0,022	-0,124	0,120
Styczeń January	0,132	-0,028	-0,242	0,686
Luty February	0,173	-0,071	-0,389	0,003
Marzec March	0,188	-0,230	-0,412	-0,022

Miesiąc Month	a	b	с	d
Październik October	0,016	0,152	-0,001	-0,110
Listopad November	0,075	0,127	-0,004	-0,082
Grudzień December	0,124	0,113	-0,004	-0,120
Styczeń January	0,213	0,097	-0,004	-0,108
Luty February	0,202	0,123	-0,006	-0,150
Marzec March	0,148	0,143	-0,011	-0,126

Miesiąc Month	a	b	с	d	e
Październik October	0,160	-0,037	-0,018	-0,206	0,001
Listopad November	0,137	-0,029	0,047	-0,139	-0,026
Grudzień December	0,149	-0,057	0,052	-0,084	-0,030
Styczeń January	0,126	-0,035	0,141	-0,205	-0,026
Luty February	0,169	-0,053	0,085	-0,304	-0,074
Marzec March	0,179	-0,043	0,075	-0,328	-0,234

Tabela 5. Wzór 4 – zestawienie obliczonych współczynników (źródło: opracowanie własne)**Table 5.** Formula 4 – summary of calculated coefficients (source: own study)

Tabela 6. Wzór 5 – zestawienie obliczonych współczynników (źródło: opracowanie własne) **Table 6.** Formula 5 – summary of calculated coefficients (source: own study)

Miesiąc Month	a	b	С	d	e	f	g
Październik October	-0,002	0,142	0,024	-0,059	-0,013	-0,028	0,021
Listopad November	0,217	-0,005	-0,039	-0,048	-0,011	0,034	0,011
Grudzień December	0,013	0,172	0,045	-0,085	-0,012	-0,049	0,018
Styczeń January	0,002	0,239	0,071	-0,067	-0,021	-0,076	0,015
Luty February	0,026	0,237	0,059	-0,117	-0,017	-0,066	0,016
Marzec March	-0,047	0,259	0,059	-0,095	-0,013	-0,072	0,020

W kolejnym kroku dokonano pozytywnej oceny szacowania promieniowania całkowitego przy pomocy współczynników R² oraz RMSE, które zostały obliczone na tym samym zbiorze co współczynniki do wzorów 1–5 (tab. 7).

Month/ Period	R ² (%) – Wzory 1–5 R ² (%) – Formulae 1–5						RMSE [M] – Wzory 1–5 RMSE – Formulae 1–5				
Micsiąc/ Okies	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
Październik October	61,5	60,4	64,1	66,0	67,3	2,1	2,1	2,1	2,0	1,9	
Listopad November	43,5	41,6	43,8	47,8	47,0	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	
Grudzień December	38,8	37,0	40,1	44,7	46,1	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	
Styczeń January	40,3	38,9	33,9	40,1	42,4	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	
Luty February	51,9	51,6	47,7	52,8	52,1	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	
Marzec March	62,2	61,3	62,2	67,3	66,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,5	
Październik–Marzec October–March	76,5	76,0	76,4	78,5	78,9	1,8	1,9	1,8	1,8	1,7	

Tabela 7. Współczynniki dopasowania wzorów szacowania 1–5 (źródło: opracowanie własne) **Table 7.** Estimation formula fit coefficients 1–5 (source: own study)

Generowanie danych meteorologicznych

Do modelowania promieniowania całkowitego wykorzystano scenariusz RCP Raportu Specjalnego Scenariuszy Emisyjnych. Wybór scenariuszy RCP w stosunku do wcześniej stosowanych scenariuszy emisyjnych SRES, w tym najczęściej stosowanego w Polsce scenariusza A1B, podyktowany był lepszym odwzorowaniem przyszłych temperatur (van Vuuren i Kainuma, 2011). W szczególności prognozy temperatury dla Polski przewidują niższe temperatury niż w poprzednich scenariuszach SRES (Special Report on Emissions Scenarios), co jest istotne ze względu szacowania zmian promieniowania całkowitego. Dodatkowo scenariusze RCP według nowych globalnych modeli cyrkulacyjnych uwzględniają koncentrację gazów CH₄ i N₂O przewidywanych dla roku 2100, a scenariusze RCP4.5 i RCP6.0 (RCP) zbliżone są do projekcji modeli GISS Model E, HadCM3, GFDL R15 (wcześniej stosowanych i opartych na scenariuszach emisyjnych SRES).

Przy uwzględnieniu koncentracji CH_4 i N_2O łączne równoważne stężenie CO_2 szacowane jest na około 550 ppm (RCP4.5) oraz 670–700 ppm (RCP6.0) dla roku 2100. Dlatego, biorąc pod uwagę bogate doświadczenie ze scenariuszami SRES dla Polski, w symulacjach uwzględniono jako najbardziej prawdopodobny dla Polski scenariusz RCP6.0. (Kuchar i in., 2018; IPCC, 2000, 2018, 2021).

Dla oszacowania promieniowania całkowitego wygenerowano 500-letnie ciągi dobowych temperatur minimalnych i maksymalnych oraz opadów dla scenariusza RCP6.0 dla horyzontu prognozy dla roku 2060 oraz dla 2000 roku przyjętego jako rok referencyjny (tab. 8). Do wygenerowania danych wykorzystano model WGENK, który jest modyfikacją powszechnie stosowanego modelu WGEN (Richardson i Wright, 1984). Wykorzystywanie generowanych danych zarówno dla roku referencyjnego, jak i dla przyszłego horyzontu czasowego pozwala na porównanie ze sobą wyników uzyskiwanych na zbiorach o takiej samej wielkości, które z racji swoich rozmiarów powinny odzwierciedlić wszystkie możliwe przebiegi pogody, ponadto takie szeregi danych pozbawione są trendów wynikających ze zmiany klimatu.

	Miesięczne minimum temperatury [°C] Monthly min temperature [°C]				Miesięczne maksimum temperatury [°C] Monthly max temperature [°C]				Opady miesięczne [mm] Monthly total precipitation [mm]			
Month/ Period Miesiąc/ Okres	Okres referencyjny References period 2000		Czas integracji Lead time 2060		Okres referencyjny References period 2000		Czas integracji Lead time 2060		Okres referencyjny References period 2000		Czas integracji Lead time 2060	
	Avg	Sd	Avg	Sd	Avg	Sd	Avg	Sd	Avg	Sd	Avg	Sd
Październik October	4,7	1,8	7,7	1,8	14,5	1,8	17,5	1,8	27,7	13,8	30,0	16,2
Listopad November	0,1	1,5	2,9	1,7	6,8	1,8	9,6	2,1	37,0	14,2	40,3	16,2
Grudzień December	-2,9	2,2	-0,1	2,4	2,8	1,9	5,7	2,2	34,5	13,1	39,0	14,3
Styczeń January	-4,1	2,9	-0,9	3,0	2,6	2,6	5,9	2,7	22,7	8,5	24,7	9,1
Luty February	-3,6	2,9	-0,6	3,3	3,9	2,7	7,3	3,1	24,2	10,9	27,0	12,0
Marzec Marc	-0,8	1,6	2,3	1,6	7,8	2,1	11,0	2,2	35,0	14,6	36,6	16,9
Październik–Marzec October–Marc	-1,1	3,7	1,9	3,8	6,4	4,6	9,5	4,7	30,2	13,9	32,9	15,6

Tabela 8. Podsumowanie danych symulowanych (WGENK, RCP6.0 scenario) (źródło: opracowanie własne)**Table 8.** Summary of simulated data (WGENK, RCP6.0 scenario) (source: own study)

Dla okresu jesienno-zimowego przy scenariuszu RCP6.0 szacuje się, że średnia miesięczna minimalna temperatura wzrośnie z $-1,1^{\circ}$ C do $1,9^{\circ}$ C, natomiast średnia miesięczna maksymalna temperatura wzrośnie z 6,4°C do 9,5°C. Mimo wzrostów średnich temperatur prognozowana amplituda (T_{max} – T_{min}) zostanie na podobnym poziomie 7,5°C vs 7,6°C.

W horyzoncie 2060 jest spodziewana większa średnia miesięczna suma opadów w porównaniu z rokiem referencyjnym: z 30,2 (mm) do 32,9 (mm), przy jednoczesnym wzroście wariancji (ryc. 3.), (tab. 8).

WYNIKI

Trzecim, finalnym krokiem pracy było zastosowanie przygotowanych wcześniej wzorów szacowania (wraz ze współczynnikami) do danych generowanych. W rezultacie oszacowano promieniowanie całkowite za pomocą pięciu wariantów formuł zarówno w horyzoncie 2060, jak i dla danych referencyjnych 2000 roku (tab. 9).



Ryc. 2. Średnia miesięczna temperatura minimalna i maksymalna dla danych generowanych. (źródło: obliczenia własne w generatorze WGENK, scenariusz RCP6.0)

Fig. 2. Monthly average min and max temperature of generated data. (source: own calculations in the WGENK generator, RCP6.0 scenario)





Fig. 3. Total monthly precipitation of generated data (source: own calculations in the WGENK generator, RCP6.0 scenario)

Month/	Wzór 1 Formulae 1		Wzór 1 Formulae 2		Wzór 1 Formulae 3		Wzó Formu	r 1 lae 4	Wzór 1 Formulae 5	
Month/ Period Miesiąc/ Okres	Okres referen- cyjny References period 2000	Czas integracji Lead time 2060								
Październik October	222,1	217,5	223,1	217,7	228,3	224,7	228,8	226,3	228,1	218,7
Listopad November	99,6	95,9	99,6	95,9	104,8	100,6	101,8	98,4	105,2	100,4
Grudzień December	64,3	62,7	64,9	62,7	70,3	67,9	67,8	64,9	68,6	65,8
Styczeń January	98,1	95,6	98,1	95,0	104,5	101,7	101,7	99,1	102,8	98,2
Luty February	156,3	152,3	155,7	151,2	173,4	168,3	167,2	162,2	171,1	164,2
Marzec March	288,4	266,6	290,3	267,0	309,3	286,8	298,5	275,5	301,4	273,1
Październik – Marzec October – March	154,8	148,4	155,3	148,3	165,1	158,3	161,0	154,4	162,9	153,4

Tabela 9. Średnie miesięczne promieniowanie całkowite [MJ/m²] dla danych symulowanych (źródło: opracowanie własne) **Table 9.** Average monthly total radiation [MJ/m²] for simulated data (source: own study)

Dla każdego z użytych wzorów i horyzontu 2060 uzyskano statystycznie istotnie (testy dla porównania średnich) niższe promieniowanie niż dla okresu referencyjnego (2000). Oznacza to, że w okresie jesienno-zimowym możemy spodziewać się mniejszej ilości energii pozyskanej z paneli fotowoltaicznych. Średnio szacuje się, że w horyzoncie 2060 zanotujemy w całym okresie jesienno-zimowym od 38,2 do 56,7 (MJ/m²) mniej energii niż w okresie referencyjnym 2000 (około 959 [MJ/m²]), co daje spadek o 5%. Najmniejszy spadek uzyskano w październiku – 2%, natomiast największy w marcu – 8%. W pozostałych miesiącach współczynnik ten wynosi 4% dla listopada i grudnia oraz 3% dla stycznia i lutego. Oszacowanie takie uzyskano dla różnych wzorów (ryc. 4.).



Ryc. 4. Średnie miesięczne różnice w promieniowaniu całkowitym: wartość dla horyzontu 2060 – wartość dla okresu referencyjnego 2000 (źródło: opracowanie własne)

Fig. 4. Average monthly differences in total radiation: value for the horizon 2060 – value for the reference period 2000. (source: own study)

DYSKUSJA

Jak opisano we wcześniejszych fragmentach pracy, postanowiono zbadać, jak zmieni się promieniowanie w okresie jesienno-zimowym na nizinnych obszarach Polski w perspektywie 60 lat. Aby to zrobić, wykonano kilka kroków badawczych. Pierwotnie wybrano pięć wzorów, które są szeroko stosowane w literaturze przedmiotu do szacowania promieniowania całkowitego na podstawie dobowych wartości temperatury minimalnej i maksymalnej oraz opadu (tab. 1). Celowo wybrano wzory, które korzystają z minimalnej liczby parametrów, łatwych do uzyskania. Następnie dla każdego miesiąca i dla każdej formuły z osobna wyznaczono stałe występujące we wzorach (tab. 2–6), wykorzystując standardowe dane meteorologiczne z lat 2001-2010 dla Wrocławia. W tabeli 7 zamieszczono uzyskane współczynniki dopasowania R² i błąd średniokwadratowy RMSE. Najwyższe współczynniki dopasowania uzyskano dla października i marca, najniższe dla grudnia i stycznia, jest to skutek większej zmienności promieniowania w październiku i marcu w stosunku do grudnia i stycznia. W tym przypadku wartość błędu średniokwadratowego (RMSE) jest najniższa, gdy również współczynnik determinacji R² osiąga najniższą wartość. Najniższe wartości promieniowania są obserwowane w grudniu i styczniu, najwyższe w październiku i marcu. Na ogół przy dobrym dopasowaniu wysoki współczynnik R² daje niską wartość RMSE, w tym wypadku jest odwrotnie, co wynika z niższych wartości średnich miesięcznych promieniowania i związanej z tym niższej zmienności w okresie najchłodniejszych miesięcy.

Mając przygotowany zbiór danych generowanych, co opisano w podrozdziale *Generowanie danych meteorologicznych*, można było przystąpić do szacowania promieniowania całkowitego. Wyniki pokazano w tabeli 9, a różnice pomiędzy rokiem referencyjnym a 2060 zilustrowano na rycinie 4. Wszystkie formuły pokazują, że w okresie październik–marzec w przyStanek, P., Leśny, J., Kuchar, L., Broszkiewicz-Suwaj, E. (2024). Ocena wykorzystania instalacji fotowoltaicznej w okresie jesienno-zimowym w aspekcie zmiany klimatu. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 23 (2), 97–110. DOI: http://dx.doi.org/10.15576/ASP.FC/188747

szłych warunkach klimatycznych będzie niższe promieniowanie całkowite. Przy czym najwyższy spadek obserwowany jest w marcu, sięga on blisko 10%. Od listopada do lutego spadek wynosi na ogół poniżej 5%, przy czym wszystkie formuły dają bardzo zbliżone rezultaty. Zastanawiające wyniki uzyskano w październiku, tutaj formuły najbardziej różnią się pomiędzy sobą i spadki procentowo są też najniższe.

W pracy Jerez i in. (2015) przeanalizowano wpływ zmiany klimatu na bezpośrednią produkcję energii z paneli fotowoltaicznych w całej Europie. Niniejszy artykuł skupia się natomiast na promieniowaniu całkowitym, które może mieć szersze zastosowania, m.in. w ogrzewaniu wody i powietrza, jak wspomniano we *Wprowadzeniu*. Pomimo różnic w metodologii i zakresie badań (scenariusze klimatyczne i ich horyzont czasowy, zastosowany model, przedział czasowy), uzyskane wyniki wskazują na prawdopodobną tendencję spadkową (w odniesieniu do Polski) dostępnej energii w postaci promieniowania całkowitego.

Ogólnie pokazane w pracy tendencje są niekorzystne dla terenów nizinnej Polski, opierają się one jednak głównie na prognozach scenariusza RCP 6.0, zatem można mieć pewne nadzieje, że ten scenariusz się nie ziści i wówczas sytuacja dotycząca promieniowania może być inna. Abstrahując od rozważanej w artykule kwestii, pewny jest wzrost temperatury, a co za tym idzie, spadek zapotrzebowania na energię cieplną wykorzystywaną w ogrzewaniu, jednak jest to temat wykraczający poza ramy niniejszego artykułu.

WNIOSKI

Przeprowadzona analiza zmian promieniowania w okresie jesienno-zimowym, czyli w czasie gdy jest go najmniej, a jednocześnie zapotrzebowanie na energię jest najwyższe, pokazuje bardzo niekorzystną tendencję spadku dostępnego promieniowania całkowitego. Przy czym analizy wykonano, wykorzystując scenariusz RCP 6.0, i uzyskane rezultaty są prawdopodobne w stopniu odpowiadającym prawdopodobieństwu zaistnienia scenariusza RCP 6.0. Warto jednak dodać, że spodziewany wzrost temperatury powietrza powinien jednak ograniczyć częściowo zapotrzebowanie na energię.

LITERATURA

- Chen, S., Zhang, G., Xia, X., Setunge, S., Shi, L. (2020). A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings. Energy and Buildings, 216. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109944
- Fan, J., Chen, B., Wu, L., Zhang, F., Lu, X., Xiang, Y. (2018). Evaluation and development of temperature-based empirical models for estimating daily global solar radiation in humid regions. Energy, 144, 903–914. DOI: 10.1016/ j.energy.2017.12.091
- Hunt, L.A., Kuchar, L., Swanton, C.J. (1998). Estimation of solar radiation for use in crop modelling. Agric for Meteorology, 91, 293–300.
- IPCC (2000). Climate Change 2000: Emissions Scenarios. Report, Eds. N. Nakicenovic, R. Swart. Cambridge: UK: Cambridge University Press.
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Report, Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.J. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press.
- IPCC (2018). Climate Change 2018: Global Warming of 1.5°C. Report, Eds. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield. Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press.
- IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Report, Eds. V. (Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou.). Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press.
- Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R. et al. (2015). The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. Nature Communication, 6, 10014. DOI: 10.1038/ ncomms10014
- Karaca, C. (2023). Estimation of daily global solar radiation based on different whitening applications using temperature in Mediterranean type greenhouses. Italian Journal of Agrometeorology, (1), 79–93. DOI: 10.36253/ijam-2144
- Kuchar, L. (2004). Using WGENK to generate synthetic daily weather data for modelling of agricultural processes. Mathematics and Computers in Simulation, 65 (1–2), 69–75. DOI: 10.1016/j.matcom.2003.09.009

Stanek, P., Leśny, J., Kuchar, L., Broszkiewicz-Suwaj, E. (2024). Ocena wykorzystania instalacji fotowoltaicznej w okresie jesienno-zimowym w aspekcie zmiany klimatu. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 23 (2), 97–110. DOI: http://dx.doi.org/10.15576/ASP.FC/188747

- Kuchar, L., Iwanski, S., Jelonek, L. (2018). Simulation of the minimum annual river flows based on the RCP climatic scenario, time horizon up to 2060–2080 and the Kaczawa River. ITM Web Conferences 23, 00021. DOI: 10.1051/itmconf/20182300021
- Kuchar, L., Kotkowski, G., Kuchar, K., Otop, I. (2014). Estimation of solar radiation for use in weather-crop models in Poland. ESA Conference Proceedings 13th Congress, 25–29 August 2014, Debrecen (Hungary), 1, 245–246.
- Leśny, J., Panfil, M., Urbaniak, M. (2018). Influence of irradiance and irradiation on characteristic parameters for a solar air collector prototype. Solar Energy, 164, 224–230.
- Leśny, J., Panfil, M., Urbaniak, M., Schefke, R. (2015). Examining technical solutions for a prototype of a solar-air collector. Technical Scinces, 18(2), 125–135.

Molga, M. (1986). Meteorologia rolnicza. Warszawa: PWRiL.

- Qiu, R., Li, L., Wu, L., Agathokleous, E., Liu, C., Zhang, B., Luo, Y., Sun, S. (2022). Modeling daily global solar radiation using only temperature data: Past, development, and future. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 163(C), 112511. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112511
- Richardson, C.W., Wright, D.A. (1984). WGEN: A model for generating daily weather variables. US ARS-8, United States Department of Agriculture, Agricultural Research Services, Washington, DC.
- Sowa, S. (2018). Increasing the energy efficiency of hybrid RES installations using KNX system. Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation, 387–394.
- Sowa, S. (2020). The implementation of renewable energy systems, as a way to improve energy efficiency in residential buildings. Polityka Energetyczna, 23, 2, 19–36. DOI: 10.33223/epj/122354

- Stanek, P., Kuchar, L., Otop, I. (2018). Estimation of diurnal total radiation based on meteorological variables in the period of plant vegetation in Poland. ITM Web Conferences, 23, 1–6, 00032. DOI: 10.1051/itmconf/20182300032
- Uçkan, İ., Khudhur, K.M. (2022). Improving of global solar radiation forecast by comparing other meteorological parameter models with sunshine duration models. Environ Sci Pollut Res, 29, 37867–37881. DOI: 10.1007/ s11356-022-18781-3
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. (2011). The representative concentration pathways: An overview. Climatic Change, 109, 5. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z
- Wang, N., Ghaeili, N., Wang, J., Feng, Y., Zhang, E., Chen, C. (2023). Using architectural glazing systems to harness solar thermal potential for energy savings and indoor comfort. Renewable Energy, 219, 1, 119436.
- Woli, P., Paz, J.O. (2012). Evaluation of various methods for estimating global solar radiation in the south-eastern United States. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51, 5, 972–985.DOI: 10.1175/ JAMC-D-11-0141.1
- Wu, G., Liu, Y., Wang, T. (2007). Methods and strategy for modelling daily global solar radiation with measured meteorological data – A case study in Nanchang station, China. Energy Conversion and Management, 48 (9), 2447–2452.
- Xing, L., Feng, Y., Cui, N., Guo, L., Du, T., Wu, Z., Zhang, Y., Wen, S., Gong, D., Zhao, L. (2023). Estimating reference evapotranspiration using Penman-Monteith equation integrated with optimized solar radiation models. Journal of Hydrology, 620, Part A, 129407. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129407

EVALUATION OF THE USE OF A PHOTOVOLTAIC INSTALLATION IN THE AUTUMN AND WINTER IN THE ASPECT OF CLIMATE CHANGE

ABSTRACT

Aim of the study

In the face of inevitable climate change and high energy demand during the heating season (October–March), an attempt was made to estimate the change in available total radiation over a 60-year perspective (2000–2060).

Material and methods

Five formulas based on standard meteorological data (temperature, precipitation) were used to estimate radiation, for which parameters were determined based on actual observations from Wrocław, which is a good representative of the southern, lowland part of Poland. Precipitation and temperature values for the year 2060 and the RCP 6.0 scenario, as well as background (year 2000), were obtained using the WGENK meteorolog-ical data generator.

Results and conclusions

The results obtained indicate that with the expected increase in temperature and precipitation, total radiation may decrease by 5% during the October–March period in the year 2060 compared to the reference year 2000.

Keywords: climate change, Representative Concentration Pathways (RCPs), daily total radiation