

Anna WACHOWICZ-PYZIK¹

Anna SOWIŹDŹAŁ²

Leszek PAJĄK³

WYKORZYSTANIE MODELOWANIA NUMERYCZNEGO DO OKREŚLENIA WPŁYWU KONFIGURACJI OTWORÓW NA PARAMETRY EKSPLOATACYJNE DLA DUBLETU GEOTERMALNEGO W REJONIE CHOSZCZNA

Modelowanie numeryczne umożliwia ograniczenie ryzyka związanego z wyborem lokalizacji otworów wiertniczych, a także optymalizację eksploatacji ujęcia, zapewniając mu długoletnią pracę przy jego optymalnych parametrach. Odpowiedni dobór oprogramowania, a także adekwatna metodyka wykorzystywana przy tworzeniu modeli numerycznych, w zależności od dostępnych danych, w znaczny sposób wpływa na jakość uzyskanych wyników. W niniejszym artykule rozważono wpływ odległości otworów wiertniczych wchodzących w skład dubletu geotermalnego oraz dobór optymalnego wydatku eksploatacyjnego przy użyciu kodu TOUGH2, wykorzystującego do obliczeń metodę różnic skończonych. Za obszar modelowy przyjęto rejon położony w strefie między niecką szczecińską a monokliną przedsudecką, w której zlokalizowany jest istniejący otwór wiertniczy Choszczno IG-1. Praca podzielona została na dwa etapy. W pierwszym etapie rozpatrywane były zmiany odległości otworu produkcyjnego i zatłaczającego oraz ich wpływ na prace dubletu. W drugim etapie analizie poddano wpływ wydatku ujęcia. Na podstawie uzyskanych wyników zaproponowano optymalną lokalizację otworu zatłaczającego oraz chłonnego oraz wielkość wydatku.

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne, metoda różnic skończonych, energia geotermalna

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Anna Wachowicz-Pyzik, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, amwachow@agh.edu.pl

² Anna Sowiźdźał, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, ansow@agh.edu.pl

³ Leszek Pająk, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, pajakl@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie

Modelowanie numeryczne powszechnie wykorzystywane w wielu dziedzinach nauki, w tym również w zagadnieniach dotyczących geotermii, odgrywa obecnie kluczową rolę już w początkowych etapach projektowania inwestycji o charakterze geotermalnym [1]. Modele numeryczne pozwalają na odzwierciedlenie geologicznej struktury ośrodka jak również procesów w nim zachodzących [2; 3; 4; 5; 6; 7; 8], ułatwiając tym samym przewidzenie możliwych do wystąpienia zjawisk związanych z eksploatacją wód podziemnych, takich jak choćby niepożądane zjawisko kolmatacji odwiertów [9], czy też korozji elementów strefy przyodwiertowej, które stanowią w Polsce duży problem w przypadku inwestycji geotermalnych szczególnie na obszarze Niżu Polskiego. Problem ten wynika między innymi z wysokiej mineralizacji ujmowanych wód [10]. Metody numeryczne wykorzystywane są również w zagadnieniach pokrewnych, związanych z wymianą masy w ośrodkach geologicznych. Przykładem może być prognozowanie propagacji zanieczyszczeń [11].

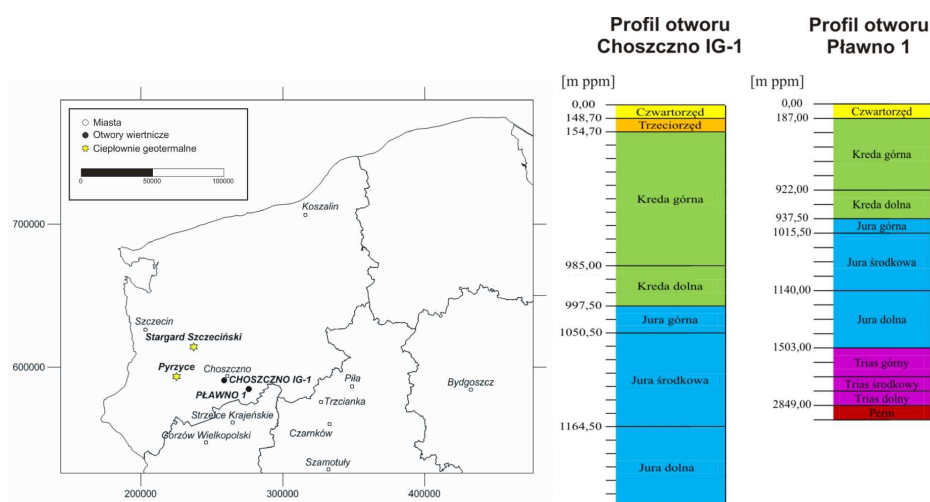
W przypadku zagadnień związanych z przepływem masy i ciepła modelowanie numeryczne opiera się głównie na dwóch metodach obliczeniowych, którymi są: metoda elementów skończonych oraz metoda różnic skończonych [12]. Metody te powszechnie wykorzystywane są przez specjalistyczne symulatory, które ułatwiają przeprowadzanie obliczeń, a tym samym określenie potencjału danego obszaru, bądź też doboru optymalnych parametrów pracy instalacji tak aby zapewnić jej bezpieczną długoletnią pracę [13; 14; 15, 16].

W obliczu wysokich kosztów związanych z wykonaniem odwiertów dobrym rozwiązaniem jest wykonanie szeregu symulacji, jeszcze przed podjęciem wiążących decyzji inwestycyjnych, co może niekiedy pomóc w uniknięciu wielu problemów wynikających z nieprzemyślanej decyzji podejmowanych w początkowych etapach inwestycji bądź ułatwić dobór optymalnych parametrów. Do parametrów, których optymalizacja może być prowadzona, dzięki modelowaniu numerycznemu, zaliczyć można: konfigurację odwiertów (rozmieszczenie w terenie i ilość), ich odległość oraz średnice. Obliczenia numeryczne obarczone są zawsze niedokładnościami (błędami), wynikającymi między innymi ze stosowanych założeń upraszczających. Wiarygodne modele charakteryzować się muszą wynikami oddającymi ilościowo i jakościowo naturę zjawisk jakie opisują. Do źródeł błędów, niezależnych od procesu modelowania numerycznego, niewątpliwie zaliczyć można jakość (poprawność) zebranych danych tj. geologiczne, geofizyczne, hydrologiczne i inne dostępne dla zadanego obszaru obliczeniowego. Błędy związane z modelowaniem zależne są od wyboru metody numerycznej, czyli doboru odpowiedniego oprogramowania, zasięgu obszaru modelowego, który nie powinien być ani za mały ani za duży (nie potrzebnie wydłużając czas obliczeniowy) oraz sposób zadania i wybór warunków brzegowych. Nie bez znaczenia jest również doświadczenie osoby, która przeprowadza symulacje. Istotne jest to czy potrafi ona interpretować otrzymane wyniki i oceniać ich realność. Parametrem, który

określa się na drodze modelowania numerycznego jest wzajemne oddziaływanie na siebie otworów geotermalnych. Optymalizuje się w ten sposób odległość otworu produkcyjnego i chłonnego, która z jednej strony zapewni długoletnią pracę systemu z drugiej zmniejszy straty związane z przesyłem energii i ograniczy nakłady na wykonanie rurociągu połączeniowego. Nie bez znaczenia jest również wielkość wydajności z jaką pracuje dublet geotermalny. Zbyt duży wydatek może bowiem doprowadzić do szybkiego wychłodzenia się zbiornika warstwy wodonośnej a tym samym przyczynić się do skrócenia okresu w jakim możliwe będzie wykorzystanie wysokiej temperatury wód podziemnych.

2. Konceptyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne

Modelowanie numeryczne wykonano dla obszaru zlokalizowanego w północno-zachodniej części Polski, geologicznie obejmującego swym zasięgiem rejon niecki szczecińskiej, a dokładnie antyklinę Choszczna (Rys. 1).



Rys. 1. Lokalizacja otworu wiertniczego Choszczno IG-1 i Pławno 1 wraz z profilami geologicznymi otworów, na podstawie CBDG oraz [17]

Fig. 1. Location of Choszczno IG-1 and Pławno 1 boreholes with geological borehole profiles, based on CBDG and [17]

W strefie tej zlokalizowany jest otwór Choszczno IG-1, który dla celów modelowania numerycznego został wykorzystany jako otwór eksploatujący wodę geotermalną. Otwór Choszczno IG-1 wykonany został w rejonie wsi Zamęcin na południe od miejscowości Choszczno w ramach tzw. pierwszego etapu rozpoznania budowy geologicznej Niżu Polskiego [17]. Głównym zadaniem prac badawczych w tej strefie, było wykrycie ewentualnych luk stratygraficznych w utworach kredy i jury, a także pozyskanie danych do interpretacji przekrojów sejsmicznych

wykonanych w tym rejonie w roku 1957 [17]. Otwór wykonany został między 17.12.1958 r. a 04.04.1960 r., w trakcie wiercenia z powodów komplikacji technicznych otwór od głębokości 310 m począł się krzywić, dzięki czemu na głębokości 1084 m odchylenie od pionu osiągnęło 390 m. Otwór zlikwidowano dnia 28.05.1960 r. za pomocą korków cementowych (na głębokościach 1500,5-1050,0 oraz 50-0 m) oraz pastą iłowo-cementową [17]. Profil otworu Choszczno IG-1 oraz zlokalizowanego w jego sąsiedztwie otworu Pławno-1 przedstawia Rys. 2.

W analizowanym rejonie największe perspektywy wykorzystania zasobów geotermalnych związane są z utworami dolnojurajskimi [5; 6]. Osady jury dolnej, rozprzestrzenione na całym obszarze niecki szczecińskiej, charakteryzują się naprzemianległym ułożeniem warstw środowiska jeziornego i rzeczno-jeziornego. Warstwami wodonośnymi w utworach jury dolnej niecki szczecińskiej są kompleksy piaskowców. Najlepszymi parametrami zbiornikowymi cechują się piaszczyste utwory warstw radowskich i mechowskich, a nieznacznie gorszymi także utwory warstw komorowskich i kamieńskich. Warstwy radowskie wykształcone są głównie jako osady piaszczyste. Wśród warstw mechowskich dominującą rolę odgrywają osady piaszczyste, zawierające przewarstwienia utworów słabo przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych wykształconych w postaci mułowców i iłowców. Osady piaskowcowe jury dolnej rozdzielają serie osadów słabo przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych wykształconych w postaci mułowców i iłowców. Kompleks izolujący stanowią utwory warstw łobeskich i gryfickich cechujące się najwyższymi wartościami zailenia w całym profilu dolnojurajskim [5; 6].

W rejonie Choszczna utwory jury dolnej występują na głębokości od 1164,5 m ppm do 1468,0 m ppm osiągając miąższość 303,5 m. Zbiornik dolnojurajski podścielony jest utworami triasu górnego reprezentowanymi przez fację ilasto-piaszczystą oraz utwory wapienia muszlowego w facji węglanowej o łącznej miąższości 444,5 m (dane z otworu wiertniczego Pławno 1, na podstawie CBDG). Powyżej dolnojurajskiej serii perspektywicznej w otworze Choszczno IG-1 zalegają utwory jury środkowej o miąższości 114,0 m, na których zgodnie zalegają na przemian ległe piaskowce i mułowce górnourajskie o miąższości 53 m. Utwory jurajskie przykryte są utworami kredowymi o miąższości 842,8 m oraz utworami trzeciorzędowymi o miąższości 6 m i czwartorzędowymi o miąższości 148,7 m [17].

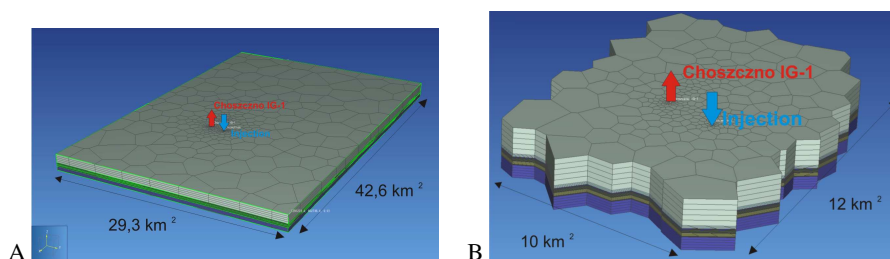
Gęstość powierzchniowego strumienia ciepłego Ziemi, na obszarze niecki szczecińskiej przyjmuje jedne z najwyższych wartości tego parametru w skali Polski. Kształtują się one w zakresie od prawie 70 do ponad 100 mW/m². Wartości minimalne, rzędu 70-75 mW/m² rejestrowane są w strefie wschodniego obrzeżenia niecki szczecińskiej, podczas gdy wartości maksymalne, przekraczające 90 mW/m², związane są ze strefą południową niecki szczecińskiej. W rejonie Choszczna gęstość powierzchniowego strumienia ciepłego Ziemi wynosi ok. 80 - 85 mW/m² [18]. Wysokie wartości strumienia ciepłego znajdują odzwierciedlenie w rozkładzie temperatur w głębinach. W rejonie Choszczna temperatury w obrębie utworów jury dolnej przyjmują wartości od 50°C w stropowej części zbiornika do ok. 60°C w części spągowej [5 ;6]. Wartości te korelują się z wynikami

przeprowadzonych w otworze badań profilowania temperatury ustalonej, na podstawie której wyliczony został stopień i gradient geotermiczny [19], którego średnia wartość osiąga $52,4 \text{ m}^\circ\text{C}$. Dzięki czemu na głębokości ok. 1390 m ppm temperatura wód podziemnych dochodzi do $45,5^\circ\text{C}$ [19]. Mineralizacja wód zbiornika dolnojurajskiego w analizowanej strefie kształtuje się na poziomie $100\text{-}125 \text{ g/dm}^3$. Potencjalna wydajność otworów w rejonie Choszczna wynosi ok. $200 \text{ m}^3/\text{h}$ [5 ;6].

Na podstawie wyników badań wykonanych dla odwiertu Choszczno IG-1 przez Instytut Geologiczny określone zostały średnie wartości porowatości efektywnej i gęstości dla poszczególnych poziomów stratygraficznych [20]. Najlepsze wartości kolektorskie wykazują utwory synemuru górnego i dolnego, dla których porowatość efektywna wynosi powyżej 20% [20]. Perspektywiczny zbiornik jury dolnej składa się w tym rejonie głównie z białych, szarych lub szarzielonych, kruchych i najczęściej drobnoziarnistych piaskowców, szarych i zwięzłych mułowców oraz szarych lub szarzielonych iłowców często o teksturze łupkowej [17]. Podczas wykonywania odwiertu wykonane zostały również badania geofizyczne na podstawie których dokonana została między innymi interpretacja ilościowa interwału jury dolnej.

3. Model numeryczny

Model numeryczny objął zasięgiem obszar o wielkości $42,6 \text{ km} \times 29,3 \text{ km}$ (Rys. 2A). Dublet geotermalny zlokalizowany został w oparciu o archiwalny otwór Choszczno IG-1, zdefiniowany w modelu jako otwór produkcyjny oraz założony (nieistniejący obecnie) otwór zatłaczający oddalony od otworu produkcyjnego o ok. 2000 m. Oddalenie otworów ma zapobiec zbyt wczesnemu wychłodzeniu warstwy wodonośnej.



Rys. 2. Model numeryczny wraz z otworami: produkcyjnym i zatłaczającym: A - model w skali regionalnej, B – model w skali lokalnej (przyodwiertowej)

Fig. 2. Numerical model with production and injection boreholes: A - regional scale model, B - local scale model

Geologiczny model rejonu Choszczna podzielony został łącznie na 9 wydziałów stratygraficznych obejmujących kolejno:

1. utwory kenozoiczne, kredowe i utwory jury górnej zalegające do głębokości 1050,0 m ppm miąższość 1050,0 m

2. utwory jury środkowej do głębokości 1164,5 m ppm – miąższość 114,5 m
3. utwory jury dolnej reprezentowane przez warstwy kamieńskie (toars górny), do głębokości 1168,5 m – miąższość 4 m
4. utwory jury dolnej reprezentowane przez warstwy gryfickie (toars dolny) do głębokości 1236,0 m ppm – miąższość 67,5 m
5. utwory jury dolnej reprezentowane przez warstwy komorowskie (domer) do głębokości 1315,3 m ppm – miąższość 79,3 m
6. utwory jury dolnej reprezentowane przez warstwy łobeskie (karyks) do głębokości 1350,5 m ppm – miąższość 35,2 m
7. utwory jury dolnej reprezentowane przez warstwy radowskie (synemur górny) do głębokości 1468,0 m ppm – miąższość 117,5 m
8. utwory jury dolnej reprezentowane przez warstwy mechowskie (synemur dolny) do głębokości 1511,0 m ppm – miąższość 43 m
9. ostatnią dziesiątą warstwą była warstwa utworów triasu sięgająca do głębokości 2020 m ppm – miąższość 509 m.

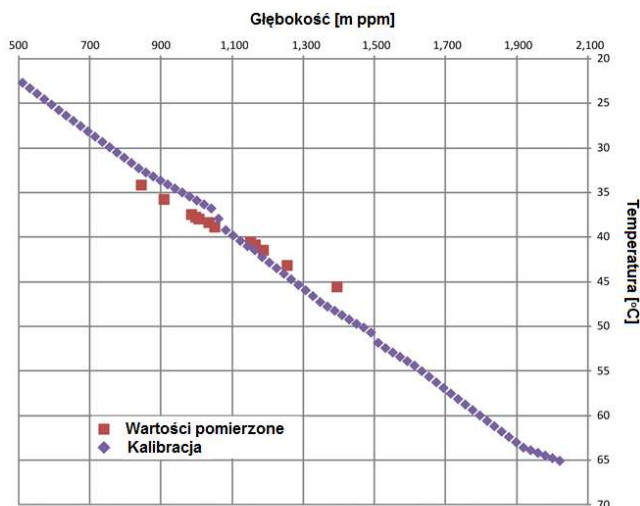
Każdej z powyższych grup wydzieleni stratygraficznych, bazując na modelu koncepcyjnym opisanym wcześniej, przypisano parametry tj. gęstość [kg/m^3], porowatość [%] i przepuszczalność [mD] (w trzech kierunkach XYZ), a także współczynnik przewodzenia ciepła [$\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$] i ciepło właściwe [$\text{J}/(\text{kg}^*\text{K})$] zgodnie z tabelą 1.

Następnie na model parametryczny nałożona została prostopadłościenna siatka obliczeniowa. Skorzystano z warunku brzegowego pierwszego rodzaju (Dirichleta) w przypowierzchniowej (kontaktującej się z atmosferą) i dennej powierzchni. Przypisano im stałą wartość ciśnienia i temperatury następnie model poddano kalibracji. Końcowy efekt kalibracji modelu do danych pomiarowych przedstawiono na Rys. 3.

Tabela 1. Zestaw parametrów zdefiniowanych na potrzeby modelu parametrycznego rejonu Choszczna

Table 1. Defined parameters of model in Choszczna area

Lp.	Wydzielenie geologiczne	Gęstość [kg/m^3]	Porowatość [%]	Przepuszczalność [mD] w kierunkach X,Y,Z	Współczynnik przewodzenia ciepła [$\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$]	Ciepło właściwe [$\text{J}/(\text{kg}^*\text{K})$]
1	Kenozoik	2060,0	2,0	0,001, 0,001, 0,01	2,1	850
2	Jura środkowa	2110,0	3,0	10,10,1	2,3	850
3	Toars górny	2100,0	3,0	10,10,1	2,5	850
4	Toars dolny	2330,0	3,0	10,10,1	2,5	850
5	Domer	1770,0	2,9	10,10,1	2,4	850
6	Karyks	2030,0	2,2	10,10,1	2,4	850
7	Synemur górny	1870,0	25,0	100,100,10	3,0	900
8	Synemur dolny	1760,0	28,0	100,100,10	3,2	900
9	Trias	1760,0	2,9	0,001, 0,001, 0,01	2,2	900



Rys. 3. Wyniki kalibracji modelu numerycznego

Fig. 3. Results of numerical model calibration

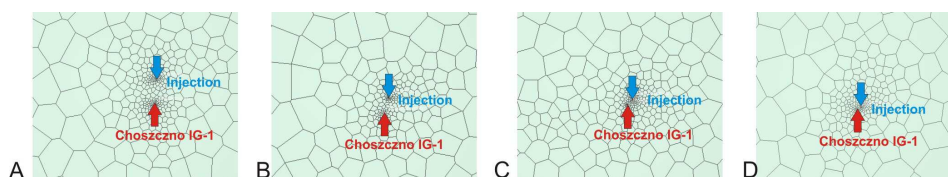
W kolejnym kroku do skalibrowanego modelu parametrycznego wprowadzono otwory wiertnicze (produkcyjny i chłonny), na model ponownie nałożono siatkę obliczeniową, tym razem była to siatka poligonalna ze względu na wprowadzone do modelu otwory wiertnicze, a model parametryczny poddano ponownej kalibracji. Otwór produkcyjny zaprojektowano do głębokości 1480 m ppm, dzięki czemu ujmował on wody poziomu warstw radowskich, tak jak otwór zatłaczający, dzięki czemu zapewniono zamknięty obieg wód podziemnych poziomu jury dolej. Początkowo wydajność eksploatacji dubletu przyjęto na poziomie 120 m³/h, przy zatłaczaniu wód o temp. 25°C przez okres 50-ciu lat. Wartość kroku obliczeniowego został dobrany automatycznie przez algorytm programu i dla zadanych 50 lat pierwszy krok obliczeniowy wyniósł 100 sekund przy maksymalnej ilości iteracji rzędu 200.

Model numeryczny w skali regionalnej (Rys. 2A) zweryfikowano odnosząc wyniki obliczeń do danych pomiarowych (Rys. 3). Otrzymane odwzorowanie rzeczywistości uznano za zadowalające. Celem skrócenia czasu obliczeń w dalszej części pracy posłużono się modelem lokalnym (Rys. 2B). Otrzymało go rezygnując z części elementów obliczeniowych leżących poza obszarem potencjalnego wpływu spowodowanego eksploatacją dubletu geotermalnego. Na brzegu rozpatrywanego w modelu lokalnym obszaru ustalono warunki brzegowe pierwszego rodzaju, zdefiniowano wartości ciśnienia i temperatury otrzymane dla każdego węzła obliczeniowego w modelu regionalnym. Model lokalny ograniczony został do rozmiarów 10 × 12 km.

3.1. Dobór lokalizacji otworu produkcyjnego i chłonnego

W celu optymalizacji pracy dubletu geotermalnego niezbędne jest zachowanie odpowiedniej odległości pomiędzy otworem produkcyjnym i chłonnym (zatłaczającym). Zbyt bliska lokalizacja otworów może zaowocować szybkim wychłodzeniem strefy zbiornika między otworami, a tym samym spadkiem temperatury i dalej mocy cieplnej całego systemu. Zbyt dalekie oddalenie otworów może przyczynić się do wysokich strat ciepła i dużej mocy pomp obiegowych. Wysoki stopień urbanizacji również wpływa na lokalizację otworów wiertniczych, ograniczając w znacznym stopniu możliwości lokalizacji nowych inwestycji.

W pierwszym etapie prac rozpatrywane były różne odległości pomiędzy otworami produkcyjnym i chłonnym. Modelowania przeprowadzono kolejno dla odległości (Rys. 4) 3000 m, 2000 m, 1000 m i 500 m.



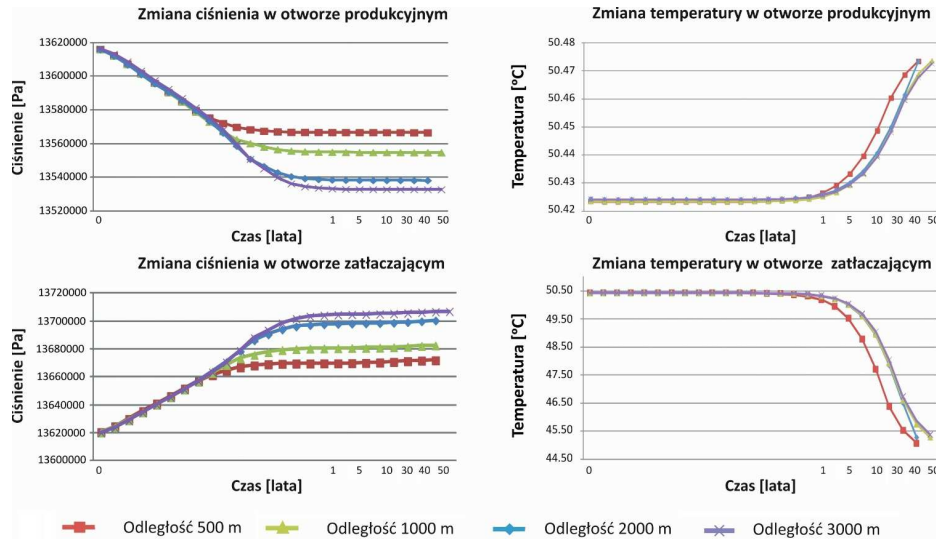
Rys. 4. Warianty zmiany odległości otworów produkcyjnego i zatłaczającego A- 3000 m, B – 2000 m, C – 1000 m, D – 500 m

Fig. 4. Variants of distance changes between production and injection borehole A- 3000 m, B - 2000 m, C - 1000 m, D – 500 m

Modelowanie przeprowadzono wykorzystując gęstość siatki obliczeniowej 5000 m², przy zatłaczaniu wód o temperaturze 25°C przez okres 50-ciu lat. Analizie poddano wyniki ciśnienia i temperatury w otworze produkcyjnym i chłonnym (Rys. 5).

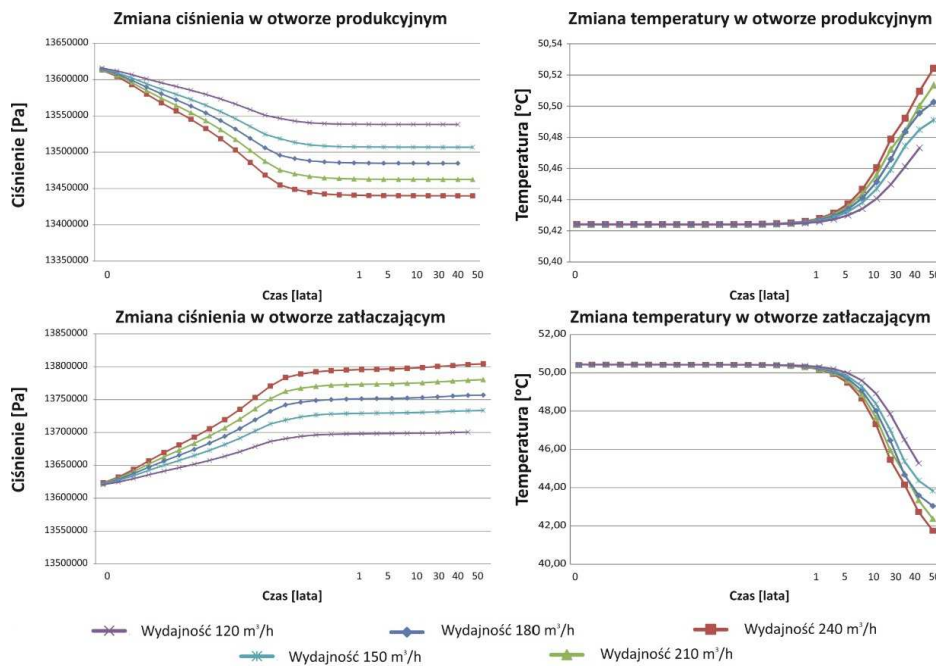
3.2. Dobór wydatku eksploatacyjnego

W następnym kroku analizie poddano różne wydajności eksploatacji ujęcia były to oprócz zakładanego we wcześniejszym etapie wydatku wielkości 120 m³/h również 150 m³/h, 180 m³/h, 210 m³/h i 240 m³/h. Każdy przypadek rozpatrywany był dla wszystkich analizowanych w pierwszym etapie, konfiguracji rozstawu dubletu. W każdym przypadku rozkład ciśnienia dla kolejnych wartości wydatku zarówno w otworze produkcyjnym jak i chłonnym był zbliżony (Rys. 6). W przypadku temperatury rozkład dla kolejnych wartości wydajności również był podobny, w żadnym z rozpatrywanych przykładów nie odnotowano znaczącego spadku temperatury, która mogłaby przyczynić się do ochłodzenia zbiornika wód dolnojurajskich. Poniżej zaprezentowano wyniki analizy ciśnienia i temperatury przy założeniu różnych wydatków ujęcia dla rozstawu 2000 m.



Rys. 5. Zmiany ciśnienia i temperatury dubletu geotermalnego przy założeniu różnych odległości otworów produkcyjnego i zatłaczającego

Fig. 5. Pressure and temperature changes in geothermal doublet with different distances between production and injection boreholes



Rys. 6. Zmiany ciśnienia i temperatury dubletu geotermalnego przy założeniu różnych wydatków pracy dubletu dla rozstawu 2000 m pomiędzy otworami

Fig. 6. Pressure and temperature changes in geothermal doublet with different volume of exploitation for the distance of 2000 m between production and injection boreholes

4. Podsumowanie

Celem artykułu było zwrócenie uwagi czytelnika na problem wiarygodności wyników otrzymanych dzięki stosowaniu modelowania numerycznego oraz ocena ilościowa rozbieżności dla wybranej strefy (studium przypadku). Biorąc pod uwagę otrzymane wyniki modelowania wpływu odległości otworów wchodzących w skład dubletu geotermalnego oraz wielkości wydatku eksploatacyjnego można stwierdzić, iż zarówno zmiany wydajności jak i odległości otworów wpływają na wyniki obliczeń.

W przypadku zmian wydajności, w każdym rozpatrywanym rozstawie otworów tworzących dublet, zmiany ciśnienia (spadek ciśnienia w strefie otworu produkcyjnego i wzrost w strefie otworu chłonnego) były wprost proporcjonalne do zmian wydajności (Rys. 6). Dodatkowo Wartość zmian ciśnienia jest tym większa im większa jest odległość między otworami (Rys. 5). W przypadku temperatury zaobserwowano wyraźny jej spadek w sąsiedztwie otworu chłonnego. W sąsiedztwie otworu produkcyjnego nie obserwuje się spadku temperatury, świadczy to o marginalnym znaczeniu zjawiska tzw. przebiccia frontu chłodnego – polegającego na dopływie do strefy otworu produkcyjnego ochłodzonej wody zatłaczanej do złoża. Można zatem uznać, że wszystkie warianty są bezpieczne z energetycznego punktu widzenia, w analizowanym przedziale czasu dla analizowanego modelu. Temperatura w otworze produkcyjnym nieznacznie rośnie w trakcie eksploatacji, przyrost ten jest jednak marginalny (wynosi ok. 0.1°C – Rys. 5 i 6). Wyraźny spadek temperatury w sąsiedztwie otworu chłonnego, we wszystkich analizowanych przypadkach, obserwowany jest po pierwszym roku eksploatacji dubletów.

*Praca została zrealizowana w ramach umów AGH
11.11.140.321, 11.11.150.008 i umowy AGH 15.11.140.349*

Literatura

- [1] Miecznik M., Sowizdzał A., Tomaszewska B., Pająk L., 2015 - Modelling geothermal conditions in part of the Szczecin Trough – the Chociwel area. *Geologos* 21, 3, s. 187-196.
- [2] Bujakowski W., Barbacki A., Miecznik M., Pająk L., Skrzypczak R., Sowizdzał A., 2015 - Modelling geothermal and operating parameters of EGS installations in the lower triassic sedimentary formations of the central Poland area. *Renewable Energy Volume* 80, August 01, s. 441-453.
- [3] Miecznik M., 2010 - Problematyka modelowania numerycznego 3D złóż geotermalnych, *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia Zrównoważony Rozwój* nr. 1-2/2010, s. 61-73.
- [4] Chowaniec J., 2009 - Studium hydrogeologii zachodniej części Karpat polskich. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 58, s. 762-773.

- [5] Sowizdzał A., 2010 - Perspektywy wykorzystania zasobów wód termalnych jury dolnej z regionu niecki szczecińskiej (północno-zachodnia Polska) w ciepłownictwie, balneologii i rekreacji. *Przegląd Geologiczny* 58, s. 613-621.
- [6] Sowizdzał, A., 2009 - Perspektywy wykorzystania zasobów geotermalnych jury dolnej w północno-zachodniej części Polski do celów ciepłowniczych, balneologicznych i rekreacyjnych. *Przegląd Geologiczny*; ISSN 0033-2151. t. 57, nr. 8, s. 660-661.
- [7] Sowizdzał, A., Papiernik, B., Machowski, G., Hajto, M., 2013 - Characterization of petrophysical parameters of the Lower Triassic deposits in prospective location for Enhanced Geothermal System (central Poland). *Geological Quarterly* 57, pp. 729-744.
- [8] Sowizdzał, A., Papiernik, B., Machowski, G., 2015 - Rola modelowania strukturalno-parametrycznego w procesie typowania potencjalnej lokalizacji zamkniętych systemów geotermicznych w skałach osadowych. *Przegląd Geologiczny*; ISSN 0033-2151, vol. 62 nr. 6, s. 303-307.
- [9] Tomaszewska B., Pająk L., 2012 - Dynamics of clogging processes in injection wells used to pump highly mineralized thermal waters into the sandstone structures lying under the Polish Lowlands. *Archives of Environmental Protection* vol. 38, no. 3 pp. 105-117.
- [10] Górecki W., Sowizdzał, A., Hajto M., Wachowicz-Pyzik A., 2015 - Atlases of geothermal waters and energy resources in Poland. *Environmental Earth Sciences*. ISSN 1866-6280, vol. 74, iss. 12, s. 7487-7495.
- [11] Olszewska A., Miśkiewicz A., Zakrzewska-Kołtuniewicz G., Lankof L., Pająk L., 2015 - Multi-barrier system against migration of radionuclides from radioactive waste repository. *Nukleonika* 60(3), s. 557-563.
- [12] Dąbrowski S., Kapuściński J., Nowicki K., Przybyłek J., Szczepański A., 2010 - Metodyka Modelowania Matematycznego W Badaniach I Obliczeniach. *Hydrogeologicznych – Poradnik* (stron 306).
- [13] Dendys M., Tomaszewska B., Pająk L., 2014 - Modelowanie numeryczne jako narzędzie wspomagające badania systemów geotermalnych, [W:] Krawc A., Jamorowska I., 2014 - Modelowanie w Hydrogeologii, Wyd. Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, ISBN 978-83-231-3299-8, s. 199-206.
- [14] Dendys M., Tomaszewska B., Pająk L., 2015 - Numerical modelling in research on geothermal systems. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series* No 9, pp. 39-44.
- [15] Zdechlik R., Tomaszewska B., Dendys M., Pająk L., 2015 - Przegląd oprogramowania do numerycznego modelowania procesów środowiskowych w systemach geotermalnych. *Przegląd Geologiczny* nr 10/2, t. 63, s. 1150-1154.
- [16] Sowizdzał, A., 2014 - Zastosowanie technik cyfrowej kartografii wgłębnej do rozpoznania potencjału geotermalnego zapadliska Przedkarpacciego - *Przegląd Geologiczny*; ISSN 0033-2151. vol. 62 nr 12, s. 842-845.
- [17] Jaskowiak-Schoeneichowa M. (red.), 1978 – Profile głębokich otworów wiertniczych Instytutu Geologicznego Choszczno IG-1. Wydawnictwa geologiczne, Warszawa (stron 130).
- [18] Szewczyk J, Hajto M, 2006 – Strumień ciepły a temperatury wgłębne na obszarze Niżu Polskiego. Heat flow versus sub-surface temperatures in the Polish Lowlands, [W:] Górecki W. (red.), 2006 - Atlas zasobów geotermalnych na Niżu Polskim. Formacje mezozoiku, MŚ, NFOŚiGW, AGH, PIG, Kraków. pp. 143-148, 149-151.

- [19] Wojtowicz J., 1978 – Wyniki badań geofizyki wiertniczej, [W:] Jaskowiak-Schoeneichowa M. (red.), 1978 - Profile głębokich otworów wiertniczych Instytutu Geologicznego Choszczno IG-1. Wydawnictwa geologiczne, Warszawa, s. 110-113.
- [20] Dąbrowski A., 1978 – Wyniki badań własności skał, [W:] Jaskowiak-Schoeneichowa M. (red.), 1978 – Profile głębokich otworów wiertniczych Instytutu Geologicznego Choszczno IG-1. Wydawnictwa geologiczne, Warszawa, s. 106-109.

NUMERICAL MODELING FOR DETERMINATION OF GEOTHERMAL DOUBLETS CONFIGURATION AND ITS INFLUENCE FOR EXPLOITATION PARAMETERS – AN EXAMPLE FROM THE CHOSZCZNO AREA

S u m m a r y

The numerical modeling enables us to reduce the risk related to the selection of best localization of wells. Moreover, at the stage of production, modeling is a suitable tool for optimization of well operational parameters, which guarantees the long life of doublets. The thorough selection of software together with relevant methodology applied to generation of numerical models significantly improve the quality of obtained results. In the following paper, we analyzed the influence of distance between the production and the injection wells on variability in time of operational parameters. The influence of yield was also examined with the TOUGH2 code, which applies the finite-difference method. The study area is located between the Szczecin Trough and the Fore-sudetic Monocline, where the Choszczno IG-1 well has been completed.

Keywords: numerical modeling, finite-differences method (FDM), TOUGH2, geothermal doublet, geothermics

DOI:10.7862/rb.2016.299

Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 20.12.2016 r.