

Przegląd wykorzystania metod modelowania numerycznego do badań hydrogeologicznych w Polsce

Review of groundwater numerical modeling use to hydrogeological research in Poland

Bartosz Felkel, Dariusz Kasztelan

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Instytut Geologii,
ul. Maków Polnych 16, 61-606 Poznań, e-mail: darkoski@amu.edu.pl

Abstract: This article presents a review of groundwater numerical modeling use for hydrogeological research in Poland. The main source of information were book series of "Contemporary Problems of Hydrogeology" published since 1980 and the articles from first Conference: "Ground Water Flow Modeling" held in 2004 in Wrocław. The following issues were analyzed in the review: software package, types of discretization network of the percolation space, as well as the main goals and results of numerical modeling. Based on the literature review common software, practical implementation and discretization ways of studied areas were presented. The lack of publication describing modeling research of transient groundwater flow in regional scale was emphasized.

Key words: numerical groundwater modeling, HYDRYLIB, MODFLOW

1. Wstęp

Badania modelowe są wykorzystywane do badań hydrogeologicznych już od kilkadziesiąt lat. Często są jedynym narzędziem do rozwiązania problemów i zagadnień badawczych, przed którymi stają hydrogeolodzy. Początkowo były to modele fizyczne, później prym wiodły metody analogowe (analizatory ciągłe, siatkowe) wykorzystujące zasadę analogii elektrohydrodynamicznej – AEHD, analizatory hydrauliczne zwane inaczej analizatorami Łukjanowa. Dziś najpopularniejszą metodą jest modelowanie numeryczne nazywane z pewnym uproszczeniem matematycznym.

Modelowanie matematyczne opiera się na analogii między opisem matematycznym różnych zjawisk fizycznych, a takim samym opisem procesu filtracji. Metody wykorzystujące tego rodzaju analogie nazywamy metodami analogowymi (Pazdro, Kozerski, 1990).

Polskie badania w zakresie modelowania matematycznego w latach 70. i 80. ubiegłego wieku stały na światowym poziomie. W roku 1972 ukazała się praca (Brylska i in.) będąca jedną z pierwszych w języku polskim, opisująca zagadnienia modelowania filtracji wód podziemnych. Dzięki staraniom pracowników Przedsiębiorstwa Hydrogeologicznego w Poznaniu w roku 1975 ukazało się tłumaczenie pracy Emsellema (1975). Zagadnienia modelowania matematycznego omawiano na konferencjach tematycznych, jak chociażby: III Konferencja „Modelowanie zagadnień brzegowych” – Jabłonna 1975, „Matematyczne modelowanie ujęć wody podziemnej” – Janowice 1978, „Rozpoznawanie wód podziemnych dla potrzeb gospodarki narodowej” – Warszawa 1978, V Konferencja „Modelowanie zagadnień brzegowych” – Jabłonna 1981, „Modelowanie dużych regionalnych systemów hydrogeologicznych” – Warszawa 1985.

Stworzona wówczas biblioteka programów obliczeniowych HYDRYLIB (Szymanko, 1982) stała na wysokim poziomie europejskim, jak i światowym. Pierwszą dokumentację powszechnie dziś wykorzystywanego do badań modelowych programu, jakim jest MODFLOW, opublikowano dopiero w roku 1988 (McDonald, Harbaugh, 1988).

W skali naszego kraju podkreślić należy osiągnięcia ośrodków poznańskiego i warszawskiego, do których z biegiem lat dołączyły zespoły naukowców z Krakowa, Wrocławia i Sosnowca. Swobodny dostęp zarówno do sprzętu komputerowego, jak i oprogramowania sprawił, iż badania modelowe są dziś powszechnie wykorzystywaną metodą badawczą. Moc obliczeniowa komputerów klasy PC, graficzny interfejs użytkownika (GUI), możliwość eksportu otrzymanych w wyniku symulacji danych, wykorzystanie baz danych czy systemu informacji geograficznej (GIS), znacznie skróciły czas potrzebny do budowy i kalibracji modelu oraz wizualizacji uzyskanych wyników.

W niniejszym artykule skupiono się przede wszystkim na analizie publikacji naukowych opisujących praktyczne zastosowanie metod modelowania numerycznego. W dużo mniejszym stopniu wzięto pod uwagę publikacje poruszające aspekt teoretyczny (skala modelu, dyskretyzacja obszaru, warunki brzegowe) tego zagadnienia.

2. Źródła informacji i analiza zebranych materiałów

Przegląd dokonań polskiej hydrogeologii w zakresie modelowania matematycznego na pierwszy rzut oka może się wydawać zadaniem łatwym i nieskomplikowanym. Dla autorów niniejszego artykułu problem pojawił się w momencie zbierania jakichkolwiek informacji o modelowaniu matematycznym w polskiej wersji językowej. W obecnej dobie elektronicznej informacji rzeczą jak najbardziej uzasadnioną jest zbadanie zasobów internetowych na dany temat. W tym momencie mamy do czynienia z pierwszym rozczarowaniem czy też zdziwieniem. Po wpisaniu w najlepszej (zdaniem autorów) przeglądarce internetowej Google hasła „modelowanie matematyczne przepływu wód podziemnych” praktycznie nie otrzymuje się żadnych informacji, które by mogły posłużyć jako źródło wiedzy do podjętego za-

gadnienia. Spośród około 330 stron zaindeksowanych w wyszukiwarce większość to strony firm, które się tą problematyką zajmują. Dla porównania po wpisaniu w tej samej przeglądarce angielskiego odpowiednika „*groundwater modeling*” otrzymujemy listę ponad 3 330 000 odnośników.

Znając ośrodki naukowe i osoby, które publikują prace na temat modelowania, również można napotkać na trudności w pozyskiwaniu informacji. Wystarczy odwiedzić strony internetowe szkół wyższych i przekonać się, że dostęp do informacji o publikacjach danych autorów jest ograniczony, a wykaz tychże publikacji niepełny. Właściwie tylko w Instytucie Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego oraz w Instytucie Geologii UAM problem ten nie istnieje.

Zdaniem autorów problem z dotarciem do jak największej liczby publikacji naukowych poruszających tematykę modelowania matematycznego przepływu wód podziemnych w dużej mierze wynika z faktu, iż nie istnieje obecnie żadne polskie czasopismo o tematyce hydrogeologicznej. Praktycznie jedynym cyklicznie ukazującym się tytułem jest cykl materiałów konferencyjnych pt.: „Współczesne problemy hydrogeologii”, który ukazuje się od 1980 r.; liczy on 12 tomów. Dwa pierwsze wydania ukazały się odpowiednio w latach 1980, 1982 pt.: „Współczesne problemy hydrogeologii regionalnej”, a tomy III i IV w latach 1985 i 1988 pt.: „Aktualne problemy hydrogeologii”, od roku 1991 (tomy V do XII) materiały wydawane są już regularnie w cyklu dwuletnim pod nazwą „Współczesne problemy hydrogeologii”. W związku z napotkanymi trudnościami jedyną możliwością rozwiązania postawionego sobie problemu było ograniczenie się do przestudiowania wszystkich materiałów konferencyjnych z cyklu „Współczesne problemy hydrogeologii” oraz I tomu materiałów konferencyjnych „Modelowanie przepływu wód podziemnych”. Zawarte w wymienionych (13) tomach materiałów konferencyjnych artykuły obejmują okres ponad 25 lat badań naukowych polskich hydrogeologów.

Po zebraniu wszystkich tomów przystąpiono do opracowania artykułów, których tematyka dotyczyła modelowania matematycznego przepływu wód podziemnych oraz migracji zanieczyszczeń. Wszystkie wytypowane artykuły zestawiono chronologicznie w formie tabeli, w której w osobnych kolumnach zamieszczono następujące dane:

- autor,
- temat,
- zadania badawcze, jakie model miał rozwiązać,
- rodzaj użytych programów komputerowych,
- typ modelu (stacjonarny, niestacjonarny),
- wielkość modelowanego obszaru,
- rodzaj siatki dyskretyzacyjnej,
- uzyskane wyniki badań modelowych.

Przykład opracowanych artykułów przedstawiono w tabeli 1. Kompletne zestawienie znaleźć można w pracy Felkela (2006).

Tabela 1. Przykładowe zestawienie zebranych artykułów
Table 1. Exemplary list of collected articles

| Autorzy | Temat | Wielkość modelu | Program komputerowy | Rodzaj modelu Nie/Stacjonarny | Siatka dyskretyzacyjna | Zadania i wyniki | Uwagi/ Źródło |
|--|--|----------------------|---------------------|-------------------------------|---|---|-----------------------|
| S. Dąbrowski, M. Trzeciakowska, Przedsiębiorstwo Geologiczne, Wrocław | „Odnawialność wód podziemnych niecki radomskiej w świetle badań modelowych” | 1281 km ² | HYDRYLIB | Stacjonarny | b. d. Trzywarstwowy | Cel: określenie bilansu krążenia wód podziemnych Wyniki: mapy hydroizohips, bilans krążenia wód podziemnych | WPH 91* s. 89–94 |
| R. Duda, S. Witczak, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków | „Stały model hydrogeologiczny rejonu zbiornika «Żelazny Most» jako podstawowe narzędzie do oceny oddziaływania na środowisko i sposobów ochrony wód podziemnych” | 120 km ² | HYDRYLIB | Stacjonarny | $\Delta x = \Delta y = 150$ m b. d. | Cel: określenie stopnia zagrożenia i sposobów ochrony środowiska wód podziemnych Wyniki: obraz warunków krążenia wód podziemnych | WPH 93* s. 197–204 |
| A. Kowalczyk, J. Kropka, K. Rubin, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec | „Zasoby wód podziemnych zbiornika triasowego (GZWP) Gliwice na podstawie badań modelowych” | 141 km ² | HYDRYLIB | Stacjonarny | $\Delta x = \Delta y = 400$ m Dwuwarstwowy | Cel: ocena zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych wód podziemnych Wyniki: mapy hydroizohips, bilans przepływu wód podziemnych | WPH 97* s. 85–90 |
| B. Jaworska-Szulc, Politechnika Gdańska | „Ocena zasobów eksploatacyjnych w warunkach intensywnego współdziałania ujęć w rejonie Trójmiasta” | 228 km ² | MODFLOW | Stacjonarny | $\Delta x = \Delta y = 100$ m Dwuwarstwowy | Cel: ustalenie zasobów eksploatacyjnych wód czwartorzędowych Wyniki: bilans przepływu wód podziemnych, mapy hydroizohips | WPH 05* s. 275–280 |

3. Przegląd zebranej literatury

Przestudiowanie zestawienia ponad 50 artykułów zaowocowało licznymi, nierzadko ciekawymi spostrzeżeniami.

Bardzo wyraźnie rzuca się w oczy, które ośrodki naukowe w Polsce zajmują się modelowaniem. Można powiedzieć, że najaktywniejsze na tym polu są obecnie: Kraków, Poznań i Wrocław.

Biorąc pod uwagę wykorzystane programy komputerowe, zdecydowaną palmę pierwszeństwa przyznać należy programowi MODFLOW. Drugim pod względem powszechności zastosowania programem jest biblioteka HYDRYLIB. Poza wspomnianymi wcześniej zastosowanie znalazły także takie programy komputerowe, jak: FKW1, FKWR, FKWH, FlowNet, FIZ, FNN4, ANPLA, MMOC, MIKE SHE, CREAMS czy DEDALE-3D (Felkel, 2006). Programy te są jednak używane w pojedynczych przypadkach, często przez ich autorów i praktycznie nie mają szerszego zastosowania jako programy do modelowania matematycznego.

Kolejnym kryterium, jakie zostało wzięte pod uwagę, jest rodzaj wykonywanych modeli. W tym aspekcie przewaga modeli filtracji ustalonej nad modelami filtracji nieustalonej jest przygniatająca. W zebranych artykułach zawarto opis pięćdziesięciu modeli analizujących przepływy wody w warunkach ustalonych przy zaledwie trzech dla przepływów w warunkach nieustalonych.

Analizując wielkość modelowanych obszarów, wydzielono 3 przedziały powierzchni opisanych modeli:

- 0–500 km²,
- 500–1000 km²,
- 1000 i więcej km².

Najwięcej wykonanych modeli znalazło się w pierwszym przedziale – o powierzchni 0–500 km², niewiele mniej tworzy się dużych modeli regionalnych o powierzchni powyżej 1000 km², zaledwie dwa opisane modele znalazły się w drugim przedziale wielkości o powierzchni 500–1000 km².

Siatki dyskretyzacyjne wykorzystane do konstruowania modeli matematycznych można podzielić na siatki trójkątne i siatki prostokątne. Zdecydowana większość modelowanych obszarów była dyskretyzowana siatką prostokątną. Siatki trójkątnej użyto w sześciu przypadkach i miało to miejsce dziesięć i więcej lat temu.

Większość modeli to modele jedno-, dwu- i trzywarstwowe. Modele wielowarstwowe, np: sześćo- czy ośmiowarstwowe zdarzały się incydentalnie.

Cele, jakie są stawiane przed modelem matematycznym stanowią bardzo dużą i zróżnicowaną grupę. Najczęściej model tworzy się, aby scharakteryzować warunki krążenia wód podziemnych, a także w celu oceny zasobów wód podziemnych. Ważnym elementem, jaki rozwiązuje model matematyczny, są różnego rodzaju badania prognostyczne takie, jak: podnoszenie się poziomu wód, zmiany w środowisku gruntowo-wodnym czy prognoza czasu dopływu wód od stref zasilania do stref drenażu. W ostatnich latach coraz częstszym celem, z jakim można się spotkać, jest określenie parametrów migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych.

4. Wnioski

Na polskim rynku wydawniczym brakuje pozycji polskojęzycznych, które dogłębnie przedstawiałyby zagadnienie modelowania matematycznego od strony teoretycznej i praktycznej. Między innymi dlatego podstawowym podręcznikiem dla osób zajmujących się modelowaniem przepływu wód podziemnych jest pozycja Andersona i Woessnera (1992).

Spośród ośrodków naukowych największą intensywność w zakresie modelowania matematycznego wykazują obecnie: Kraków, Poznań i Wrocław. Na uwagę zasługuje tu mniejszy obecnie udział ośrodka warszawskiego.

Wykorzystywanie do dyskretyzacji modelowanego obszaru siatek trójkątnych miało miejsce dziesięć lat temu i dużo wcześniej. Fakt ten wiązać należy z olbrzymią popularnością dostępnego już niemal 20 lat programu MODFLOW. Kod tego programu choć napisany w języku FORTRAN dzięki licznym graficznym interfejsom użytkownika (Visual MODFLOW, GMS czy Procesing MODFLOW) i kompilacji nadaje się do wykorzystania w systemie WINDOWS. W chwili obecnej do dyskretyzacji modelowanego obszaru używa się praktycznie wyłącznie siatek prostokątnych.

Metody modelowania numerycznego są znane i wykorzystywane do badań hydrogeologicznych w Polsce już ponad 20 lat. Pomimo tego faktu w literaturze polskojęzycznej brak jest pozycji opisujących badania modelowe w zakresie analiz przepływów w nieustalonych warunkach filtracji na modelach regionalnych. Wyjątkiem są tutaj modele prognostyczne. Problemy dotyczące budowy tego typu modeli wskazuje już Szymanko (1980). Główną przyczyną takiego stanu rzeczy jest brak dostatecznie wiarygodnych i przestrzennie rozmieszczonych danych z okresu przed, w trakcie i po wybudowaniu danego obiektu (ujęcie wody, zbiornik retencyjny). Bariery takiej nie stanowią niedostatki techniczne ani też kłopoty z dostępem do programów obliczeniowych.

Większość symulacji modelowych prowadzi się na modelach jedno-, dwu- lub trzywarstwowych. Dzieje się tak, gdyż każda kolejna modelowana warstwa wnosi do modelu utrudnienia i komplikuje konstrukcję modelu. Dlatego też dąży się do maksymalnego uproszczenia modelowanego obszaru i wyznaczenia jak najmniejszej ilości modelowanych warstw wodonośnych. Jeszcze jednym aspektem, który przemawia za tworzeniem modeli o jak najmniejszej ilości warstw, jest kwestia dostępności danych hydrogeologicznych.

Na koniec trzeba podkreślić, że modelowanie matematyczne w Polsce jest ciągle rozwijającym się działem hydrogeologii. Należy szkolić młodych ludzi w tym kierunku, gdyż wiedza w tym zakresie dla hydrogeologa w obecnych czasach wydaje się niezbędna. Można by poczynić starania, aby polskie badania w zakresie modelowania matematycznego ponownie znalazły się w światowej czołówce. Mogą się do tego przyczynić następne spotkania w ramach konferencji „Modelowanie przepływu wód podziemnych”.

Literatura

- Aktualne Problemy Hydrogeologii. Kleczkowski A.S (red.). Tom III. Kraków–Karniowice 1985.
- Aktualne Problemy Hydrogeologii. Kozerski B. (red.). Tom IV. Gdańsk 1988.
- Anderson, M.P., Woessner W.W., 1992. Applied Groundwater Modeling. Academic Press, Inc., San Diego, 381 s.
- Brylska E., Dąbrowski S., Pleczyński J., Przybyłek J., Szczepański A. , 1972. Modelowanie filtracji ujęć wód podziemnych w rejonach ujęć wodnych. Wyd. Geol., Warszawa.
- Emsellem Y., 1975. Budowa modeli matematycznych w hydrogeologii. Zjedn. Przeds. Hydrogeol., PH w Poznaniu, Poznań (tłumaczenie z francuskiego).
- Felkel B., 2006. Przegląd wykorzystania metod modelowania matematycznego do badań hydrogeologicznych w Polsce. Praca licencjacka. Archiwum Instytutu Geologii UAM.
- McDonald M.G., Harbaugh A.W., 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. USGS TWRI Chapter 6-A1.
- Modelowanie przepływu wód podziemnych. Gurwin J., Staško S. (red.). Wrocław 2004.
- Pazdro Z., Kozerski B., 1990. Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- Szymanko J., 1980. Koncepcje systemu wodonośnego i metod jego modelowania. Wyd. Geol., Warszawa.
- Szymanko J. (red.), 1982. Biblioteka programów obliczeniowych HYDRYLIB Centralnego Urzędu Geologii. Z. 1–7. Wyd. Geol., Warszawa.
- Współczesne Problemy Hydrogeologii Regionalnej. Pazdro Z. (red.). Tom I. Jachranka 1980.
- Współczesne Problemy Hydrogeologii Regionalnej. Tom II. Wrocław 1983.
- Współczesne Problemy Hydrogeologii. Krajewski B. (red.). Tom V. Warszawa 1991.
- Współczesne Problemy Hydrogeologii. Poprawski L., Bocheńska T. (red.). Tom VI. Wrocław 1993.
- Współczesne Problemy Hydrogeologii. Szczepańska J., Szczepański A., Kulma R. (red.). Tom VII. Kraków–Krynica 1995.
- Współczesne Problemy Hydrogeologii. Górski J., Liszkowska E. (red.). Tom VIII. Poznań–Kiekrz 1997.
- Współczesne Problemy Hydrogeologii. Sadurski A. (red.). Tom IX. Warszawa–Kielce 1999.
- Współczesne Problemy Hydrogeologii. Bocheńska T., Staško S. (red.). Tom X. Wrocław–Krzyżowa 2001.
- Współczesne Problemy Hydrogeologii. Piekarek-Jankowska H., Jaworska-Szulc B. (red.). Tom XI. Gdańsk–Jastrzębia Góra 2003.
- Współczesne Problemy Hydrogeologii. Krawiec A. (red.). Tom XII. Toruń 2005.

