

34

SYMULACJA WPŁYWU NIELINIOWEGO SUMOWANIA SIĘ WPŁYWÓW SPOWODOWANYCH EKSPLOATACJĄ KOLEJNYCH ŚCIAN Z WYKORZYSTANIEM TEORII AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH

34.1 WPROWADZENIE

Teoria automatów komórkowych została zapoczątkowana w latach 40-tych ubiegłego wieku. Za jej autora uważa się powszechnie J. Von Neumana [7] pracującego wówczas na Uniwersytecie w Princeton w Stanach Zjednoczonych. Automat komórkowy jest matematycznym modelem zachowania się układu dynamicznego [12]. Poprzez układ dynamiczny rozumie się układ wzajemnego oddziaływania wielu czynników. Automat komórkowy zbudowany jest z regularnej siatki komórek. Komórki ściśle do siebie przylegają i mają jednakowy kształt. Przypisuje się im wartość liczbową określającą stan z ograniczonego zbioru stanów. Zmiana stanu komórki powoduje uruchomienie reakcji łańcuchowej polegającej na zmianie stanów komórek przylegających do tej komórki zgodnie z przyjętym algorytmem.

Metoda zyskała na ogromnej popularności dzięki swojej prostocie oraz złożoności otrzymywanych wyników. W latach 80-tych teoria doczekała się standaryzacji [12]. Wyróżnia się cztery podstawowe klasy automatów komórkowych.

- Klasa I

Automaty niezmiennie (zbieżne) – ewoluują do czasu, kiedy wszystkie komórki osiągną jednakowy stan niezależnie od stanu początkowego.

- Klasa II

Automaty ewoluujące (okresowe) do stanu stabilnego lub pewnych okresowych wzorców.

- Klasa III

Automaty wykazujące nieporządek (chaotyczne) w zakresie lokalnym jak i globalnym – nie wykazują żadnego wzorca.

- Klasa IV

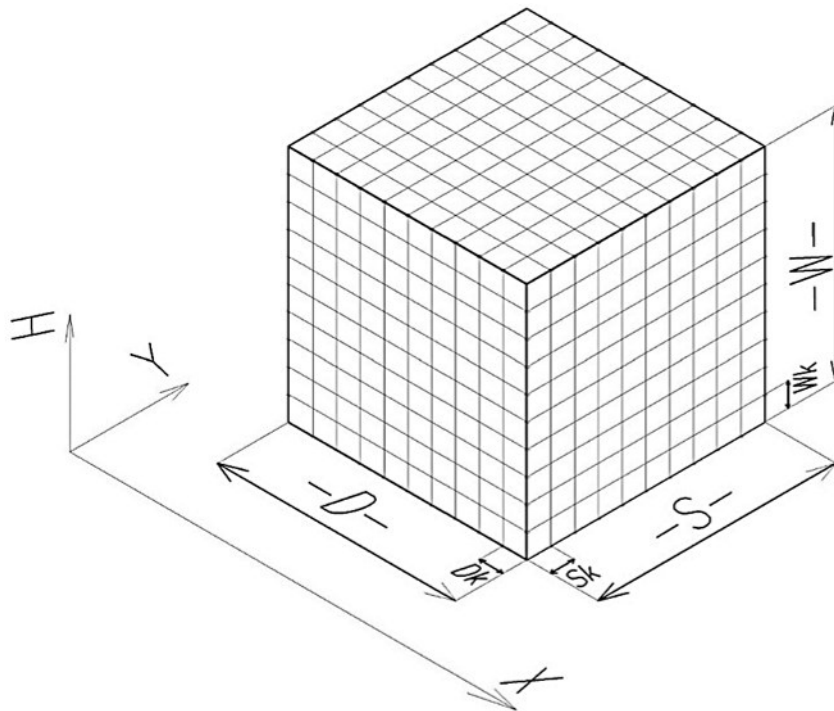
Automaty wykazujące złożone i długotrwałe zachowanie („żywe”).

Obecnie metoda stosowana jest w wielu dziedzinach nauki. Również w zakresie mechaniki górotworu oraz w szczególności w dziedzinie ochrony terenów górniczych [2, 6, 8, 9, 12]. Jedną z wielu zalet metody jest możliwość bezpośredniego symulowania nieliniowego procesu sumowania się wpływów górniczych [10].

34.2 MODEL OBLICZENIOWY JAKO SKOŃCZONY DETERMINISTYCZNY AUTOMAT KOMÓRKOWY

W teorii automatów komórkowych fragment górotworu odwzorowywany jest poprzez jego dyskretyzację w postaci regularnej siatki komórek [9, 11]. Metoda przyjmuje zasadę podobieństwa geometrycznego. Komórce przypisuje się odwzorowywane w rzeczywistości wymiary (rys. 34.1):

- Wysokość [m] – oznaczaną jako W_k – wymiar określany zgodnie z głębokością H.
- Długość [m] – oznaczaną jako D_k – wymiar zgodny z osią X.
- Szerokość [m] – oznaczaną jako S_k – wymiar zgodny z osią Y.



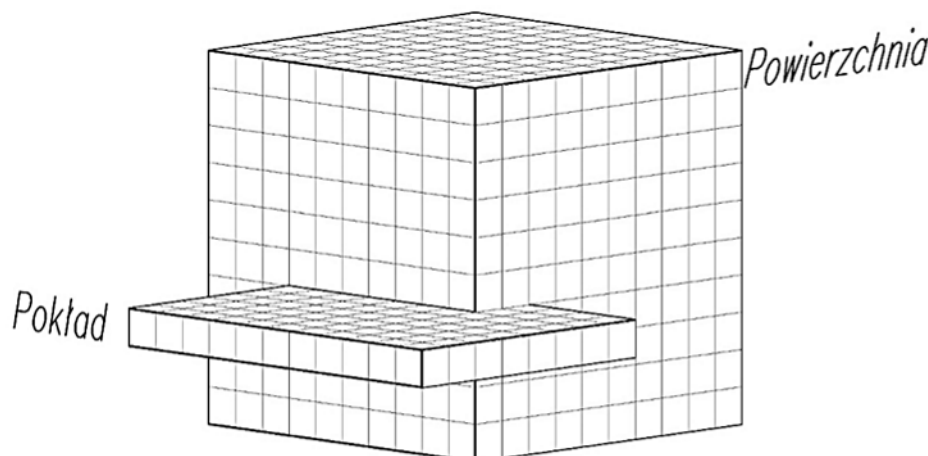
Rys. 34.1 Przestrzenna siatka automatu komórkowego o określonej ilości wierszy (W) i kolumn

Źródło: [11]

Po utworzeniu siatki wszystkie komórki przyjmują jednakowy stan określany jako pierwotny.

W modelu wyznaczany jest rozkład przemieszczeń górotworu spowodowany wybraniem złoża. Pokład odwzorowywany jest poprzez przeskalowanie jego geometrii i przypisanie odpowiadającym położeniu pokładu komórkom wartości

ekwiwalentu powstałej pustki poeksploatacyjnej (rys. 34.2). Jednocześnie komórkom tym zmienia się stan z pierwotnego na wtórny.



Rys. 34.2 Przykład fragmentu siatki komórek z wyróżnionym poziomem odwzorowującym poziomo zalegający pokład

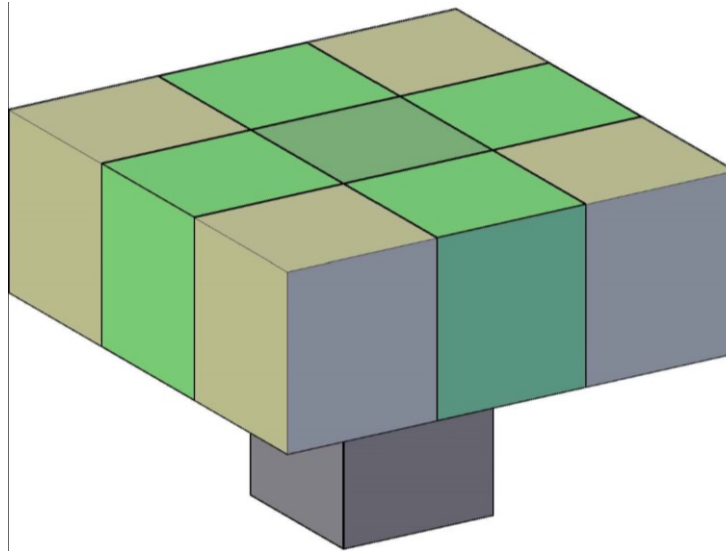
Źródło: [11]

Zmiana pierwotnego stanu równowagi pewnej grupy komórek powoduje uruchomienie reakcji łańcuchowej, polegającej na zmianie stanu komórek z bezpośredniego otoczenia. Zmiana stanu kolejnych komórek wymusza stopniową ewaluację modelu. W ten sposób symulowany jest wysyp rumoszu skalnego do powstałej pustki poeksploatacyjnej.

Proces ten może być całkowicie losowy lub ukierunkowany. Czynnikiem decydującym będzie określenie sił powodujących naturalne wypełnianie pustki w górotworze. Można założyć, że w najprostszym ujęciu zaciskanie powodowane będzie wyłącznie przez siłę grawitacji. Oznacza to, że w przyjętym układzie komórek wysyp rumoszu skalnego do danej komórki będzie się odbywał w zakresie komórek leżących jedynie na poziomie o 1 wyższym. Jednocześnie można zauważyć, że z pojedynczą komórką bezpośredni kontakt będzie miało jedynie 9 komórek z tego poziomu. W modelu ograniczono jednak ich ilość do 5 zakładając, że komórki muszą posiadać z daną komórką całą krawędź styku (rys 34.3.) [11]. Założenie jest niezbędne m.in. z uwagi na późniejszą możliwość odwzorowania szczelin uskokowych [2]. Wykazano również, że stosując zarówno 5-cio jak i 9-cio elementowe sąsiedztwo można uzyskać zbieżne wyniki (przy odpowiednio dobranej funkcji przejścia) [11].

Przestrzeń bezpośredniego oddziaływania pojedynczej komórki z siatką automatu komórkowego nazywa się sąsiedztwem komórkowym. Sąsiedztwo w trakcie ewaluacji modelu nie zmienia się.

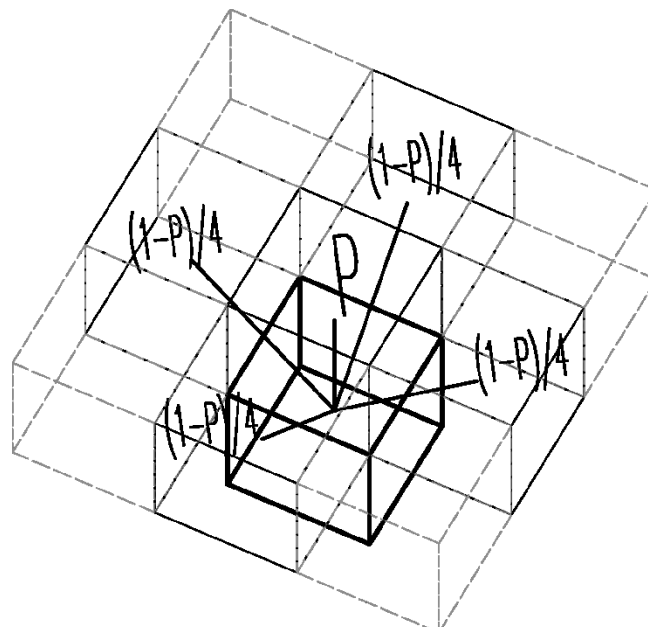
Elementem decydującym w głównej mierze o charakterystyce metody jest tzw. funkcja przejścia. Może przyjmować charakter losowy lub deterministyczny. W niniejszym artykule zastosowano wariant dyskretny.



Rys. 34.3 Przyjęte sąsiedztwo komórkowe ograniczone do 5 elementów (zaznaczone kolorem zielonym jaśniejszym)

Źródło: [12]

Funkcja przejścia jest matematycznym algorytmem określającym sposób wymiany danych między każdą z komórek automatu a komórkami z przyjętego dla niej sąsiedztwa komórkowego. Innymi słowy określa proporcje „wypływu” ekwiwalentu objętości pustki poeksploatacyjnej zarejestrowanej w danej komórce do 5-ciu stycznych komórek na poziomie nadległym (określonych jako sąsiedztwo komórkowe). Szczególne znaczenie ma przejście do komórki zalegającej bezpośrednio nad daną komórką. Zdefiniowane zostało jako przejście główne P (rys. 34.4).



Rys. 34.4 Charakterystyka deterministycznej funkcji przejścia dla symulacji przemieszczeń pionowych górotworu

Źródło: [11]

O zakończeniu symulacji decyduje klasa zastosowanego automatu określona przede wszystkim warunkami brzegowymi. W przedmiotowym modelu za warunek końcowy można uznać stan, w którym suma objętości początkowych pustek poeksploatacyjnych będzie równa sumie objętości pustek na poziomie odpowiadającym powierzchni terenu. Założenie koreluje z definicją I klasy automatów komórkowych. Ten typ automatu zbieżnego określany jest w literaturze jako skończony [9, 11].

Należy zauważyć, że zgodnie z przyjętymi założeniami, odwzorowany proces zaciskania pustki poeksploatacyjnej poprzez symulowanie rozkładu obniżenia odbywa się w modelu bezstratnie. Wobec tego na etapie odwzorowania pustki w siatce automatu należy uwzględnić współczynnik eksploatacyjny jak i w sposób geometryczny ewentualność wystąpienia tzw. obrzeża eksploatacyjnego.

W modelu obliczeniowym wszystkie komórki podlegają jednoczesnej ewaluacji. Metoda jest niezwykle efektywna numerycznie w porównaniu np. do metod numerycznych modeli ośrodków ciągłych. W krótkim czasie otrzymuje się rozkład przemieszczeń w całej siatce automatu.

34.3 NIELINIOWE EFEKTY SUMOWANIA SIĘ WPŁYWÓW

Szereg obserwacji geodezyjnych skutków podziemnej eksploatacji złóż pokładowych wskazuje na występowanie anomalii w kształcie niecek obniżeniowych. Powodowane są szeregiem czynników. Jednym z nich jest wpływ kolejności i kierunku eksploatacji na zróżnicowanie kształtu profilu niecki obniżeniowej. Zjawisko zostało dobrze opisane przez J. Białka [1] i R. Mielimąkę [5]. Możliwość symulowania nieliniowego sumowania się wpływów górniczych jest zagadnieniem ważnym z uwagi na ochronę obiektów budowlanych. W Polsce powszechnie stosowaną metodą do prognozowania deformacji powierzchni terenów górniczych jest geometryczno-całkowa teoria W. Budryka-S. Knothego. Zaletą metody jest jej prostota oraz korelacja uzyskiwanych wyników z kategoryzacją terenów górniczych. Niestety metoda jako liniowa nie ujmuje wprost wpływu czynników nieliniowych.

W tym zakresie metoda automatów komórkowych może stanowić uzupełnienie metod geometryczno-całkowych. Parametry obu metod korelują ze sobą i w zakresie liniowej funkcji przejścia pozwalają uzyskiwać zbieżne rezultaty. Przykładem może być parametr maksymalnego nachylenia a_T określający zdolność górotworu do tworzenia niecek obniżeniowych o określonym nachyleniu [2]. Parametr ściśle koreluje z parametrem $tg\beta$ w teorii S. Knothego [3].

W przypadku metody automatów komórkowych proces rozkładu obniżenia może być dowolnie zaburzany. Dla modelu płaskiego wykazano już, że możliwa jest nieliniowa symulacja sumowania się wpływów, którą można otrzymać poprzez uzależnienie wartości przejścia głównego P , od wartości już doznanego nachylenia T w siatce automatu [10] (wzór 34.1).

$$P = P_p + z_d P_p (1 - e^{-a_d |T_i|}) \quad (34.1)$$

gdzie:

P_p – ustalona przed rozpoczęciem symulacji wartość przejścia głównego dla niezaburzonej funkcji rozkładu.

Sposób wzorowany jest na podobnym rozwiązaniu zastosowanym przez J. Litwiniszyna w teorii ośrodka sypkiego [4]. W przypadku modelu przestrzennego sposób jest również skuteczny.

34.4 SYMULACJA WPŁYWU ZMIENNYCH WARUNKÓW GEOTECHNICZNYCH W OBRĘBIE PRZECIWLĘGLYCH KRAWĘDZI EKSPLOATACYJNYCH POLA ŚCIANOWEGO

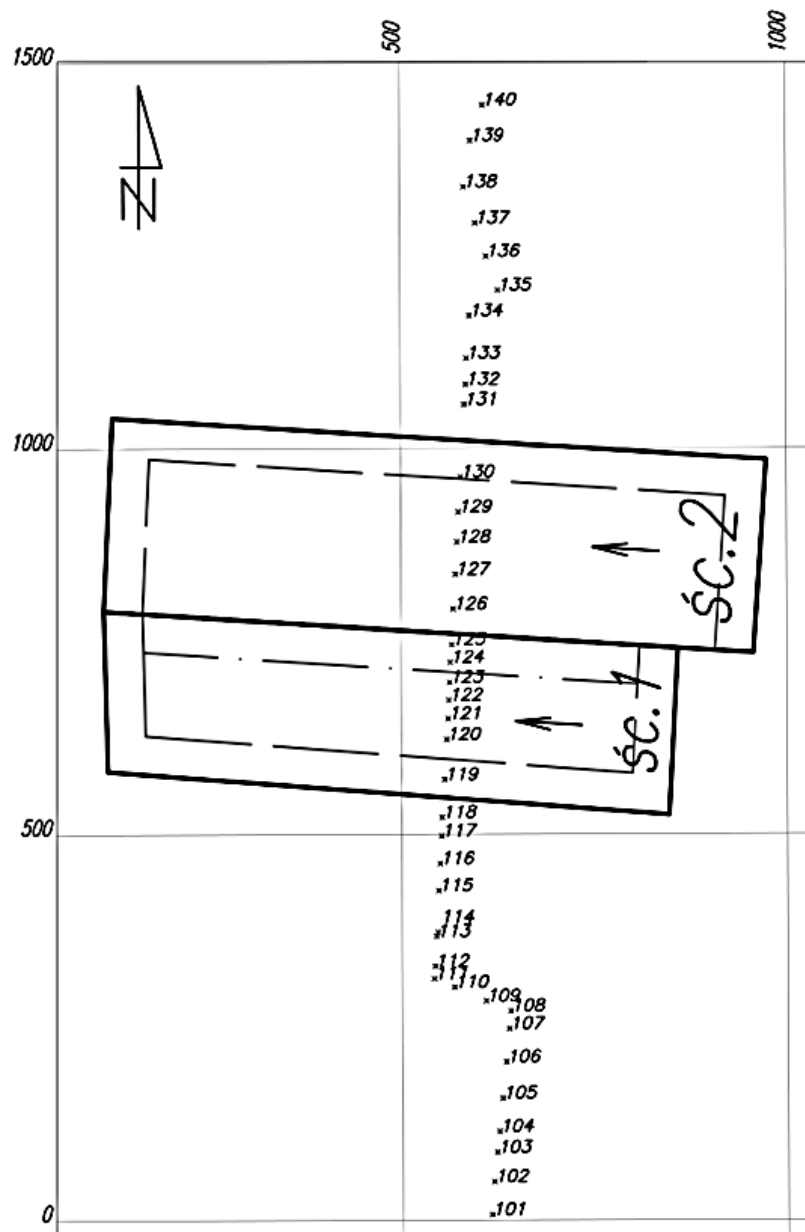
W celu pokazania możliwości metody na praktycznym przykładzie wykorzystano przypadku eksploatacji dwóch ścian – nr 1 i 2 w pokładzie 338/2 w warunkach KWK „Budryk” [6].

Wyrobiska zostały wybrane w latach 1994-1995 metodą na zawał stropu [6]. Eksploatacja odbywała się po rozciągłości złoża. Średnie nachylenie pokładu wynosiło ok. 6°. Głębokość eksploatacji wahała się od 590 m do 635 m – średnia głębokość eksploatacji wynosiła ok. 615 m. Wysokość furty eksploatacyjnej była w przybliżeniu równa grubości pokładu, tj. w przypadku ściany 1 średnio 1,8 m i w przypadku ściany 2 średnio 2,0 m. Długość ściany pierwszej wynosiła ok. 215 m natomiast ściany drugiej ok. 260 m. Odpowiednio wybiegi ścian wyniosły 746 m i 850 m.

W celu monitorowania narastających deformacji powierzchni terenu zastablizowano linię pomiarową „1”. Linia przebiegała prostopadle do kierunku eksploatacji mniej więcej nad środkiem pola eksploatacyjnego (rys. 34.5). Odległości między punktami wynosiły średnio ok. 39 m. Pomiary niwelacyjne na linii pomiarowej wykonywane były metodą niwelacji precyzyjnej.

Po wybraniu ściany nr 1 na powierzchni ujawniła się symetryczna niepełna niecka obniżeniowa. maksymalne pomierzone obniżenia wyniosły 575 mm. Jednocześnie po wybraniu ściany nr 1 maksymalne nachylenia nad obiema krawędziami eksploatacyjnymi wyniosły ok. 3,5 mm/m. Po wybraniu ściany nr 2 maksymalne obniżenia wyniosły ok. 1315 mm natomiast nachylenia nad krawędziami pola eksploatacyjnego były już różne. Nad krawędzią po stronie ściany pierwszej wyniosły ok. 7,5 mm/m, nad krawędzią ściany drugiej ok. 5,5 mm/m. Asymetria niecki obniżeniowej spowodowana była nieliniowym sumowaniem się wpływów wynikającym z eksploatacji pierwszej ściany [5].

W celu pokazania możliwości metody wykonano symulację obniżeń w trójwymiarowym modelu obliczeniowym. W pierwszej kolejności przyjęto wymiary komórki $S_k = D_k$ odnosząc się do średniej odległości między punktami linii pomiarowej. Założono wystąpienie obrzeża eksploatacyjnego.



Rys. 34.5 Kontury wyeksploatowanych parcel w pokładzie 338/2 na tle linii pomiarowej "1".

Linia przerywaną zaznaczono kontury parcel pomniejszone o obrzeże eksploatacyjne

Źródło: [6]

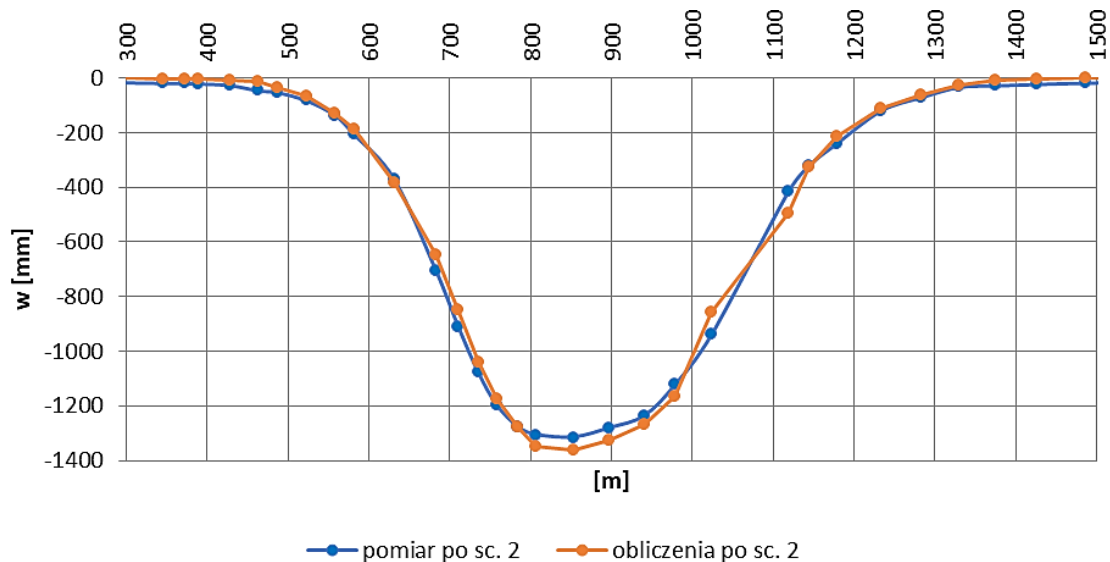
Pozostałe wartości parametrów zostały dobrane na drodze dopasowania metodą najmniejszych kwadratów do wyników obserwacji w oparciu o matematyczną charakterystykę metody wiążącą podstawowe parametry [11, 12] (wzór 34.2).

$$T_{\max(x)} = A \frac{ag}{H} \left(\frac{W_k}{D_k} \right) \left(\frac{W_k}{H} \right)^{-0,5} \left[\frac{mm}{m} \right] \quad (34.2)$$

$$T_{\max(y)} = A \frac{ag}{H} \left(\frac{W_k}{S_k} \right) \left(\frac{W_k}{H} \right)^{-0,5} \left[\frac{mm}{m} \right]$$

W ten sposób otrzymano parametry metody pozwalające wyznaczyć najlepszy profil niecki obniżeniowej w sensie dopasowania jakościowego i ilościowego do wyników pomiarów po wybraniu ściany nr 2. Parametry funkcji delinearizującej (wzór 34.1)

dobrano metodą iteracyjną zakładając wystąpienie różnicy nachyleń nad krawędziami eksploatacyjnymi rzędu 30% (zgodnie z zaobserwowanymi). Wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono w postaci profilu niecki obniżeniowej odpowiadającemu przebiegowi linii pomiarowej „1” (rys. 34.6).



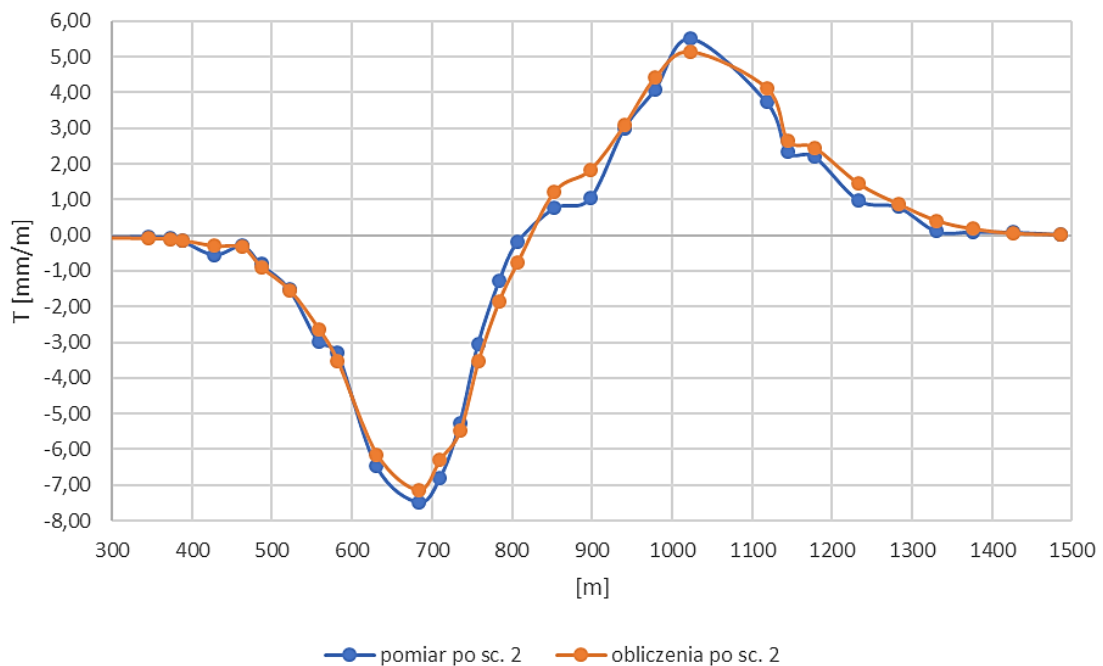
Rys. 34.6 Profile niecki obniżeniowej wzdłuż linii pomiarowej "1" wyznaczone z obliczeń numerycznych i pomiarów geodezyjnych.

Otrzymany z obliczeń numerycznych profil niecki obniżeniowej wykazuje bardzo dużą korelację z wynikami pomiarów geodezyjnych. Współczynnik determinacji R^2 wyniósł 0,996. Drobne różnice widoczne są w przypadku maksymalnych wartości obniżeń. W przypadku metody automatów komórkowych były większe o ok. 4% (1315 mm w przypadku obserwacji i 1365 mm w przypadku obliczeń).

Na podstawie wyników obliczeń przemieszczeń pionowych i znajomości odległości między punktami obliczeniowymi wyznaczono wartości nachyleń (rys. 34.7).

Wyniki pomiarów wskazują, że nad krawędzią rozruchową pola eksploatacyjnego maksymalne nachylenia wyniosły ok. 7,5 mm/m natomiast z wyników obliczeń numerycznych wartość ta była ok. 5% mniejsza i wyniosła ok. 7,15 mm/m. W rejonie krawędzie postępującej (nad ścianą nr 2) pomierzone nachylenia wyniosły ok. 5,52 mm/m natomiast obliczone ok. 5,15 mm/m. W tym przypadku wartości różniły się o ok. 7%. Asymetria niecki obniżeniowej spowodowana była powstaniem różnych warunków geotechnicznych w rejonie obu krawędzi eksploatacyjnych [5].

Uzyskanie podobnych wyników z zastosowaniem klasycznej teorii S. Knothego [3] jest niemożliwe. Niemniej praktyczne rozwiązania pozwalające na lepszy opis zjawisk nieliniowych z zastosowaniem teorii geometryczno-całkowej przedstawił J. Białek [1]. Zasadniczą poprawę opisu deformacji uzyskał poprzez uzmiennienie długości promienia wpływów od zaistniałych obniżeń.



Rys. 34.7 Nachylenia powierzchni terenu wyznaczone dla odcinków linii pomiarowej "1" na podstawie obliczeń numerycznych i wyników pomiarów geodezyjnych.

34.5 PODSUMOWANIE

W jednym z poprzednich artykułów przedstawiono opisany przypadek eksploatacji ściany 1 i 2 w pokładzie 338/2 w odniesieniu do praktycznej możliwości symulacji przemieszczeń pionowych z zastosowaniem teorii automatów komórkowych [6]. Zastosowana liniowa funkcja przejścia pozwoliła uzyskać zgodne z obserwacjami wyniki jedynie w przypadku eksploatacji pierwszej ściany. W przypadku drugiej maksymalne obniżenia powstałej niecki zostały wyznaczone poprawnie, jednak nie udało się w ten sposób ująć zaobserwowanej asymetrii niecki.

Zaproponowany już wcześniej przez Autora sposób delinearizacji jest jedną z wielu możliwości [10]. Dotychczas zagadnienie rozpatrywane było jedynie w kategoriach teoretycznych. W niniejszym artykule wykazano praktyczną przydatność rozwiązania na przykładzie rzeczywistej eksploatacji. Uzależnienie funkcji przejścia od wartości nachylenia w danej komórce (wskutek przejścia z poprzedzających komórek w siatce) powoduje zmianę proporcji wypływu ekwiwalentu objętości odpowiadającej pustce poeksploatacyjnej do komórek z sąsiedztwa komórkowego. Symulacja odbywa się pojedynczo dla kolejnych komórek odwzorowujących wyeksploatowany pokład. W ten sposób w siatce automatu z każdą kolejną iteracją rejestruje się coraz większe wartości deformacji.

Założenia teoretyczne dotyczące możliwości uwzględniania wpływu nieliniowego sumowania się wpływów zostały zweryfikowane na przykładzie rzeczywistej eksploatacji. Metoda pozwala w sposób naturalny (bezpośredni) uwzględniać szereg czynników na rozkład deformacji. Metoda cechuje się prostotą i dużą efektywnością obliczeniową. Parametry metody mogą być wyznaczone na drodze dopasowania do wyników obserwacji geodezyjnych. W przedstawiony dotychczas sposób metoda

może stanowić uzupełnienie metod geometryczno-całkowych o możliwość symulowania nieliniowego sumowania się wpływów górniczych.

LITERATURA

1. Białek J.: Wpływ własności reologicznych górotworu oraz kierunku eksploatacji na kształt niestabilnych niecek obniżeniowych. *Przegląd Górniczy* t. 69 nr 8, s. 8-13, 2013.
2. Białek J., Sikora P.: Symulacja wpływu nachylenia pokładu i szczeliny uskokowej na rozkład obniżeń za pomocą metody automatów komórkowych, *Przegląd Górniczy*, 8/2012, ISSN 0033-216X, str. 160-165, 2012.
3. Knothe S.: Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania. *Archiwum Górnictwa i Hutnictwa* t. 1 z.1, 1953.
4. Litwiniszyn J.: O pewnym rozwiązaniu równania Smoluchowskiego i możliwości jego zastosowań do mechaniki ośrodków stochastycznych. Spraw. PAN Kraków I-VI 1961.
5. Mielimaka R.: *Wpływ kolejności i kierunku eksploatacji prowadzonej frontami ścianowymi na deformacje terenu*. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2009.
6. Mielimaka R., Sikora P.: Symulacja obniżeń górotworu spowodowanych eksploatacją kolejnych ścian z wykorzystaniem teorii automatów komórkowych. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji* vol. 7 iss. 1, s. 457-469, bibliogr. 22 poz. ISSN 2391-9361, 2018.
7. Neumann J., Morgenstern O.: *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press, 1944.
8. Niemiec R., Niemiec T.: Błądzenie losowe i jego zastosowanie do modelowania deformacji górotworu powodowanych eksploatacją górniczą. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa „Górnictwo i Środowisko”* Katowice. 2008.
9. Sikora P.: Wykorzystanie deterministycznego automatu skończonego do wyznaczania profilu linii obniżeń terenu spowodowanych podziemną eksploatacją. *Przegląd Górniczy* nr 10/2010, s. 141-143, 2010.
10. Sikora P.: Wpływ nieliniowego sumowania wpływów na kształt profilu niecki obniżeniowej opisywanej przez deterministyczny model górotworu zbudowany w oparciu o teorię automatów komórkowych, str. 195-199, *Przegląd Górniczy* 2013 nr 8, ISSN 0033-216X, 2013.
11. Sikora P.: Wykorzystanie przestrzennego automatu deterministycznego do symulowania obniżeń terenu spowodowanych podziemną eksploatacją, str. 131-136, *Przegląd Górniczy* 2014 nr 8, ISSN 0033-216X, 2014.
12. Sikora P, Mielimaka R.: Determination of parameters for the prognosis of rock mass deformation with the use of the cellular automata method. *IOP Conference Series*, 2019.
13. Wolfram S.: Universality and complexity in cellular automata. *Physica D*, 10:1-35. 1984.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 03.2019

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 04.2019

**SYMULACJA WPŁYWU NIELINIOWEGO SUMOWANIA SIĘ WPŁYWÓW
SPOWODOWANYCH EKSPLOATACJĄ KOLEJNYCH ŚCIAN Z WYKORZYSTANIEM
TEORII AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH**

Streszczenie: W pracy przedstawiono przykład rzeczywistej eksploatacji pokładowej węgla kamiennego kolejnych dwóch ścian w pokładzie 338/2. Eksploatacja spowodowała powstanie na powierzchni terenu górniczego niepełnej niecki obniżeniowej, która po wybraniu ściany nr 2 cechowała się znaczną asymetrią. Deformacje powierzchni objęte były systematycznymi pomiarami niwelacyjnymi wzdłuż linii pomiarowej „1”. Dla przedstawionego przykładu podziemnej eksploatacji wykonano obliczenia numeryczne z wykorzystaniem teorii automatów komórkowych. Zastosowano nieliniową funkcję przejścia. Wyniki obliczeń numerycznych porównano z w wynikami obserwacji geodezyjnych. Celem niniejszego artykułu jest weryfikacja założeń teoretycznych przyjętych dla przestrzennego modelu górotworu jako deterministyczny skończony automat komórkowy.

Słowa kluczowe: obniżenia, górotwór, automat komórkowy

**SIMULATION OF THE NON-LINEAR SUMMATION EFFECT DUE
TO SUBSEQUENT MINING EXTRACTION USING
THE THEORY OF CELLULAR AUTOMATA**

Abstract: The paper presents an example of real subsequent hard coal mining in the seam 338/2, which caused the formation of a subsidence trough on the surface of the mining area which after extraction of the longwall No. 2 was characterized by a significant asymmetry. Surface deformations were covered by systematic leveling measurements along the measurement line “1”. For the illustrated example of underground mining, numerical calculations were made using the theory of cellular automata. A non-linear transition function was used. Calculated data were compared with the results of geodetic observations. The aim of the article was to verify the theoretical assumptions of the model and to demonstrate the practical possibilities of applying the method to assess the subsidence of the mining area.

Key words: subsidence, rock mass, cellular automaton

dr inż. Paweł Sikora

Politechnika Śląska

Wydział Górnictwa i Geologii

Katedra Eksploatacji Złóż

ul. Akademicka 2a, 44-100 Gliwice, Polska

e-mail: pawel.sikora@polsl.pl