

SYMULACJE FUNKCJONOWANIA UKŁADU PRODUKCYJNEGO KOPALNI ODKRYWKOWEJ W ŚRODOWISKU 3D

SIMULATIONS OF OPEN PIT MINE PRODUCTION IN 3D ENVIRONMENT

Sebastian Chęciński - Zakład Ekonomiki Przemysłu i Geoeconomii, Politechnika Wroclawska, Wroclaw
 Andrzej Witt - „Poltegor-Instytut” Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wroclaw

W artykule przedstawiono problematykę wykorzystania analiz symulacyjnych 3D w modelowaniu procesów produkcyjnych górnictwa odkrywkowego. Przedstawiono możliwości tworzenia reprezentacji elementów eksploatacji górniczej w środowisku trójwymiarowym oraz omówiono wpływ charakterystyki przestrzennej kopalni odkrywkowych na przeprowadzanie procesów symulacji. Omówiono zasadność wykorzystania technik symulacyjnych w projektowaniu procesów produkcyjnych górnictwa odkrywkowego oraz zaprezentowano wyniki analiz zrealizowanych dla modelowego układu produkcyjnego. Podsumowaniem publikacji jest zestawienie zalet i wad opisywanych rozwiązań, wraz z konkluzjami dotyczącymi dalszego ich rozwoju i popularyzacji.

Słowa kluczowe: symulacje, produkcja górnicza, FlexSim, analizy wariantów, modele trójwymiarowe

Article discusses basic issues related to using 3D simulation analysis for mining production processes modeling. It presents the possibilities of making a three dimensional mine elements representation, and also contains discussion about the impact of mine spatial characteristics on making simulation analysis. The article shows correct techniques of using simulation processes during the planning of mining production and presents the results of analysis made for model production system. In the summary advantages and disadvantages of the presented solutions are listed, along with conclusions for its future development and popularization.

Keywords: simulations, mine production, FlexSim, analysis of variants, 3D models

Wstęp

Jak w każdej gałęzi przemysłu ciężkiego, technologie produkcyjne w górnictwie odkrywkowym nie ulegają znaczącym zmianom w trakcie trwania cyklu życia zakładu. Związane jest to głównie z wysokimi kosztami zakupu maszyn, których nie opłaca się wymieniać w trakcie produkcji. Wszelkie zmiany parametrów produkcyjnych związane są zatem z możliwościami sterowania parametrami maszyn. Kluczową rolę pełni więc odpowiednie zaprojektowanie całego układu produkcyjnego. Ponieważ eksploatację kopaliny można realizować na wiele sposobów w zależności od warunków terenowych, usytuowania złoża, a także doboru urządzeń, pojawia się pytanie: jakie rozwiązanie będzie najlepsze dla danego złoża i na ile skutecznie można prognozować efektywność projektowanych układów?

Aktualnie udzielaniem odpowiedzi na to pytanie zajmują się inżynierowie, projektujący systemy eksploatacji oraz przygotowujący projekty zagospodarowania złóż. Jednak nawet przy optymalnym wyznaczeniu parametrów, jakie powinien posiadać układ produkcyjny w kopalni, w dalszym ciągu sposób realizacji konkretnych jego elementów może być otwarty. Przykładem może być wybór transportu samochodowego lub

przenośnikowego dla zapewnienia tej samej wydajności kopalni. W niektórych przypadkach z punktu widzenia projektowego oba typy transportu nadają się do pracy w kopalni, zatem wybór jednego z nich determinowany będzie przez inne czynniki, takie jak koszty pracy, awaryjność, możliwości inwestycyjne itp. (Witt 2011). Aby dokonywać odpowiedniego wyboru, pośród różnych akceptowalnych komponentów tworzących układ produkcyjny, niezbędne jest prawidłowe przeanalizowanie jego pracy oraz wszelkich wad i zalet, które mogą wpływać na efektywność układu i być brane pod uwagę w procesie decyzyjnym. Z pomocą mogą tu przyjść techniki symulacyjne, które są przede wszystkim źródłem wiedzy dotyczącej dynamiki cech badanego systemu, jednocześnie pozwalają na odtwarzanie historycznej dynamiki zmian, jej analizę, a także umożliwiają skuteczne projektowanie układu produkcyjnego i pozwalają na analizę przyszłych wyników jego pracy (Beaverstock i in. 2011).

Wykorzystywanie narzędzi symulacyjnych posiada już ponad półwieczną tradycję. W latach 50. XX w. powstał bowiem „The General Simulation Program”, pierwsza aplikacja do realizowania symulacji. Z uwagi na szybkość oraz łatwość tworzenia podstawowych modeli symulacyjnych, techniki te

zostały bardzo szybko dostosowane do rozwiązywania problemów produkcyjnych (Pawlewski 2010).

Warto zauważyć, iż realizacja produkcji w odkrywkowym zakładzie górniczym, jest ściśle powiązana z przestrzenią, na której się odbywa. Dotyczy to zarówno geometrii złoża oraz projektowania postępu frontów eksploatacyjnych, jak również lokalizacji zakładu przerobczego, co bezpośrednio wpływa na długość tras transportowych. Dynamiczne, w stosunku do innych układów produkcyjnych, zmiany przestrzenne w górnictwie powodują konieczność wykorzystania odpowiednich narzędzi uwzględniających dynamikę tych zmian, by móc w pełni czerpać z korzyści technologii symulacyjnych.

Stosunkowo niedawno, bo w roku 1998, w Stanach Zjednoczonych, powstała pierwsza aplikacja o nazwie Taylor ED, umożliwiająca przeprowadzanie symulacji w pełnym środowisku trójwymiarowym (Beaverstock i in. 2011). Wydarzenie to zapoczątkowało okres nieustającego rozwoju i popularyzacji tego typu rozwiązań, co dodatkowo spotęgował dynamiczny rozwój technologii komputerowych i coraz szerszy dostęp do komputerów klasy PC. Fakt, iż nowe narzędzia do symulacji umożliwiają operowanie również na zmiennych typu przestrzennego, pozwala przypuszczać, iż problematyka produkcji górniczej może się znakomicie wpasować w możliwości obliczeniowe nowych technologii. Pierwszą próbę symulacji procesów transportowych produkcji górniczej w środowisku 3D programu FlexSim, podjęto na Politechnice Wrocławskiej w roku 2014. Dotyczyła ona analizy natężenia ruchu pojazdów ciężarowych transportujących surowce do klientów i lokalizacji „wąskich gardeł” wokół zakładów górniczych (Chęciński 2014).

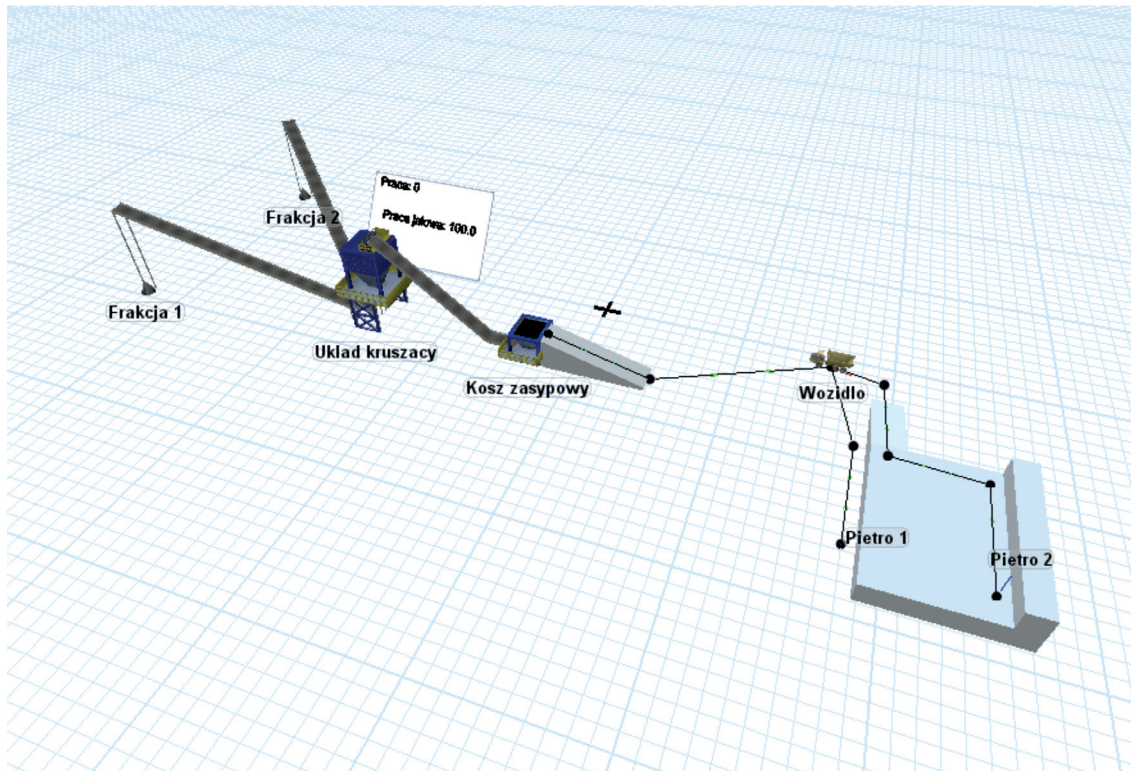
Modelowanie produkcji górniczej

Wychodząc naprzeciw zapotrzebowaniu na tworzenie efektywnych rozwiązań z zakresu planowania produkcji gór-

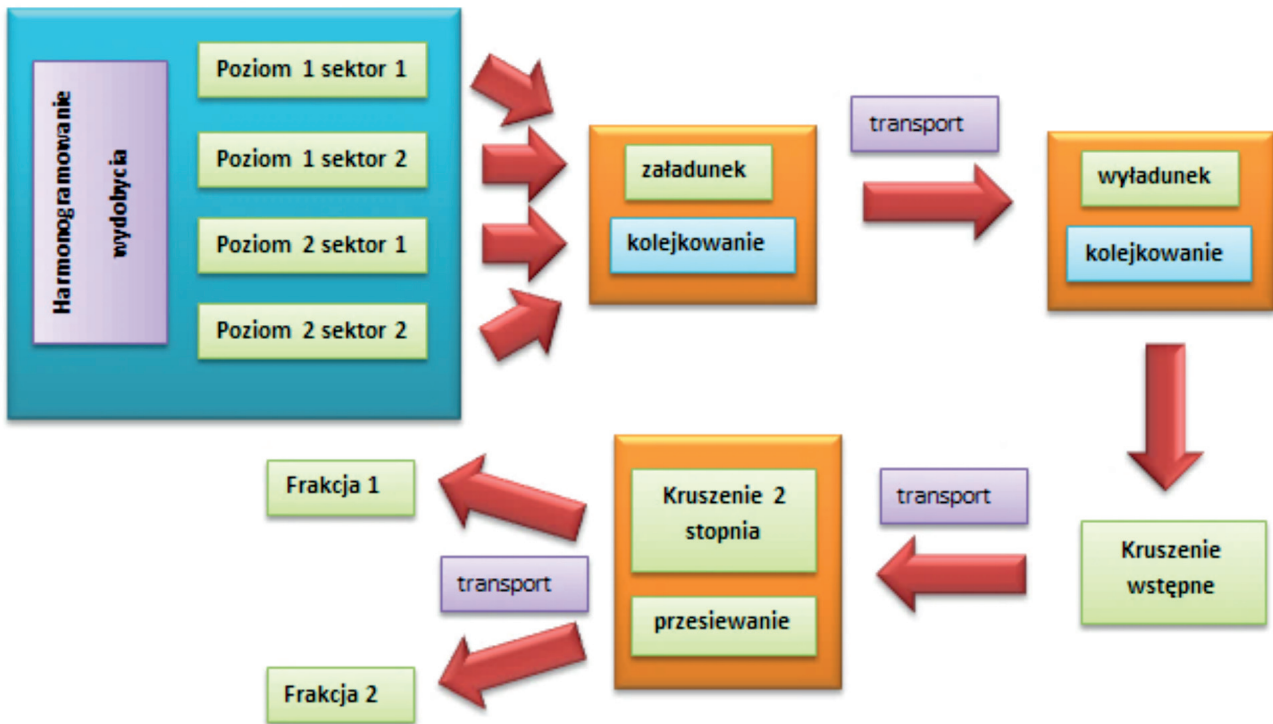
niczej, w Zakładzie Ekonomiki Przemysłu i Geokononii, Politechniki Wrocławskiej, przy współpracy z Instytutem Górnictwa Odkrywkowego „Poltegor Instytut”, podjęto inicjatywę zbudowania symulacyjnego modelu przykładowego układu produkcyjnego kopalni odkrywkowej, w środowisku 3D.

Dotychczas analizy symulacyjne i wykorzystanie technik optymalizacyjnych w górnictwie (również w środowisku 3D) były domeną zagadnień związanych z jak najlepszym wykorzystaniem złoża. Główną tematyką badań było odpowiednie zaprojektowanie prowadzenia eksploatacji górniczej, pod kątem zmienności parametrów jakościowych oraz warunków geologiczno-górnictwowych (Jurdiak, Kawalec 2007). Wykorzystywano do tego celu aplikacje modelujące zmienność złoża (np. CAE Studio), jak również programy do optymalnego harmonogramowania postępu prac eksploatacyjnych (np. NPV Scheduler). Opisana w artykule technologia modelowania i symulacji produkcji wykracza poza te zagadnienia i dotyczy jak najlepszego doboru układu produkcyjno-transportowego dla obsługi wcześniej określonego, optymalnego postępu frontów eksploatacyjnych.

Z uwagi na to, iż aplikacje do symulacji trójwymiarowych nie są w wersjach podstawowych wyposażone w modele ilustrujące elementy górniczych układów produkcyjnych (koparki, ładowarki itp.), niezbędne było wykonanie odpowiednich modeli 3D (rys. 1). Do testowego sprawdzenia możliwości symulowania produkcji wykorzystano środowisko aplikacyjne FlexSim. Modelowanie poszczególnych elementów układu produkcyjnego kopalni, jak również wierne odwzorowanie wyrobiska, w przypadku środowiska FlexSim, może być wykonane w dowolnym trójwymiarowym środowisku graficznym. Ponieważ zgodnie z zaleceniami producenta, modele muszą być odpowiednio uproszczone, do ich konstrukcji wykorzystano aplikację Trimble SketchUp, która jest w pełni wystarczająca nawet do tworzenia bardzo rozbudowanych górniczych modeli 3D (Chęciński 2014).



Rys. 1. Widok 3D przykładowego układu produkcyjnego w kopalni surowców skalnych
Fig. 1. 3D view of example production system in mineral aggregates mine

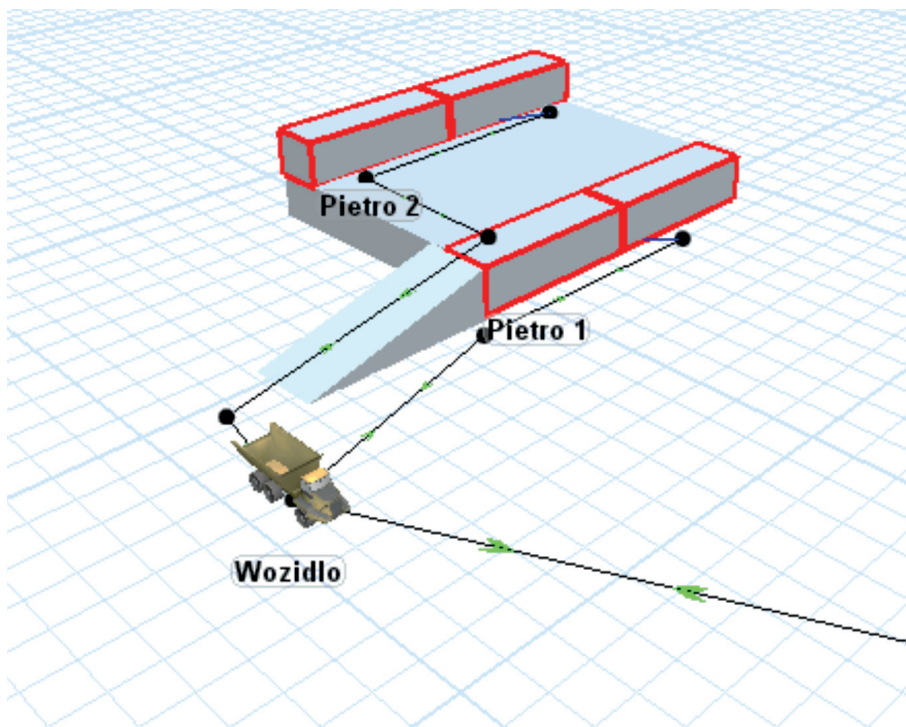


Rys. 2. Schemat przepływu urobku w modelowanym układzie produkcyjnym
Fig 2. Diagram of material flow in modeled production system

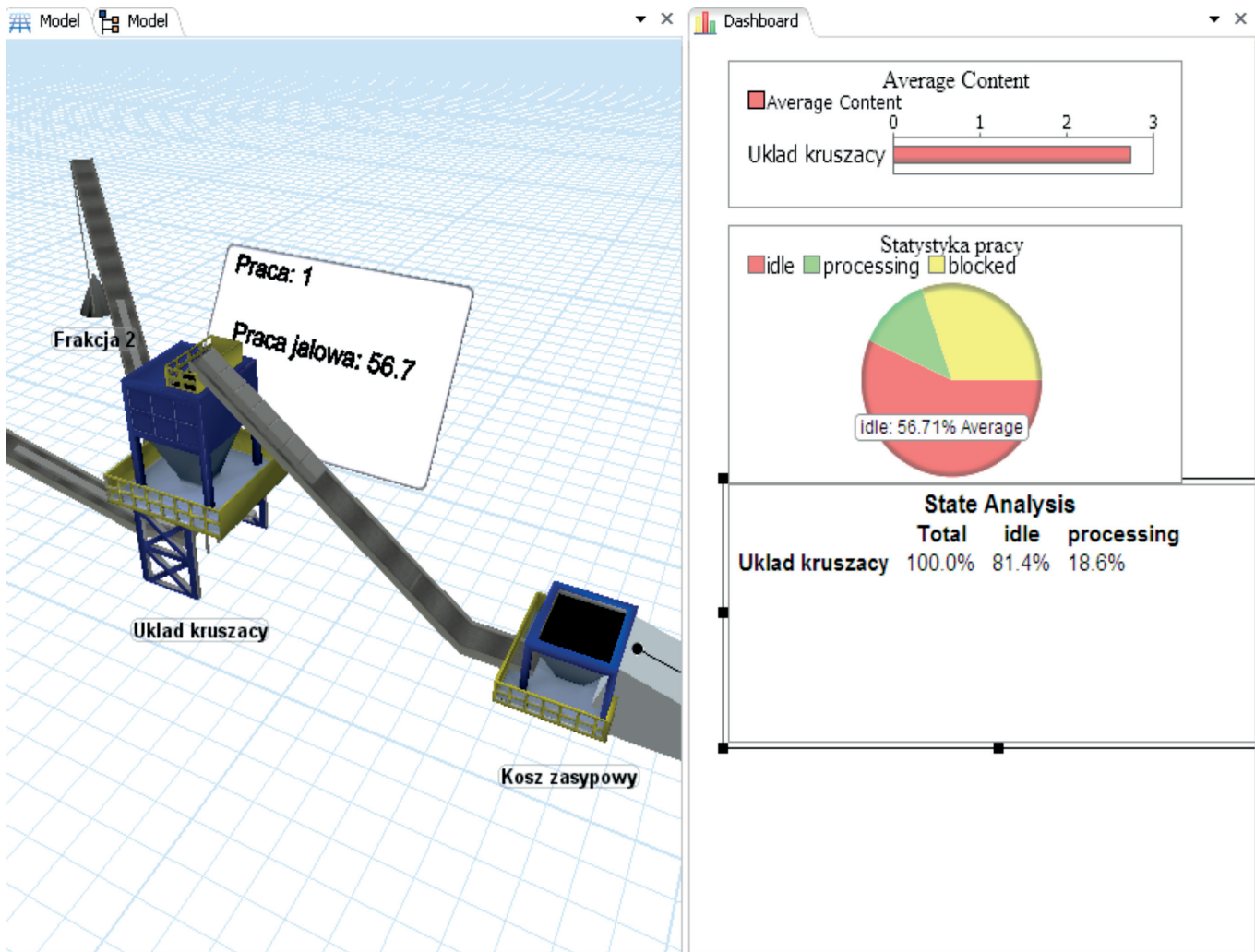
Pierwszym etapem budowy modelu symulacyjnego było opracowanie ogólnego zarysu układu produkcyjnego w kopalni odkrywkowej (rys. 2). Przyjęto, że przykładowy model składał się będzie z kosza zasypowego oraz kruszarki wstępnej oraz z układu kruszącego drugiego stopnia z przesiewaczem sitowym. Założono, że urobienie kopaliny będzie odbywało się za pomocą materiałów wybuchowych, a urobek będzie następnie transportowany do pierwszej kruszarki, która przez zespół przenośników taśmowych przekaże go do kolejnego kruszenia. Rozdrobniony materiał trafi do zestawu przesiewaczy, który kie-

ruje strugi przetworzonego urobku przenośnikami taśmowymi na miejsce składowania poszczególnych frakcji (rys. 1).

Obszar wyrobiska eksploatacyjnego został w fazie modelowania uproszczony i sprowadza się do skonstruowania dwóch pięter eksploatacyjnych, wraz z podjazdem. W analizie uwzględniono urobienie czterech sektorów w dwóch zabierkach (rys. 3). Konstrukcja modelu obejmuje zmianę reprezentacji sektorów z postaci monolitycznych skalnych bloków, do postaci urobionej, reprezentowanej przez zbiór pakietów przeznaczonych do odtransportowania. Zastosowanie takiego mechanizmu



Rys. 3. Schematyczny model pięter eksploatacyjnych
Fig. 3. Schematic model of the exploitation walls



Rys. 4. Model układu kruszącego, wraz z wykresem ilustrującym rodzaj realizowanej pracy
 Fig. 4. Crusher model, with chart showing its work type during processing

pozwała na obrazowanie przemieszczania się frontu eksploatacyjnego i ilustrowanie zmniejszania zasobów złoża.

Parametry analizy symulacyjnej

Aby przetestować możliwości realizacji poszczególnych symulacji i przeprowadzić analizy ich wyników w środowisku produkcji górniczej, niezbędny był wybór odpowiedniego parametru, którego wartość dla poszczególnych scenariuszy produkcyjnych byłaby odpowiednim miernikiem celu. Do analizy wybrano procentowy udział różnych trybów pracy układu kruszącego. Z punktu widzenia praktyki produkcyjnej, udział pracy jałowej to parametr, który bezpośrednio wpływa na efektywność działania całego układu produkcyjnego. Na potrzeby artykułu przyjęto uproszczenie, iż uruchomienie urządzenia kruszącego następuje na początku trwania zmiany produkcyjnej i trwa aż do jej zakończenia. Pożądane jest, aby maszyna ciągle wykonywała proces kruszenia i jak najmniej pracowała jałowo, z uwagi na brak materiału do obróbki. Ograniczenie ryzyka pracy jałowej to jeden z głównych elementów podejścia procesowego w logistyce, które wyznacza najwyższy stopień dojrzałości procesowej przedsiębiorstwa (Pawlewski 2011). Można śmiało założyć, iż odpowiednie zagospodarowanie pracy maszyny zależeć będzie od ilości dostarczanego materiału. Wynik analizy uzależniony będzie zatem od ilości cykli transportowych samochodów dostarczających materiał, ich pojemności lub czasu pojedynczego przejazdu, na który

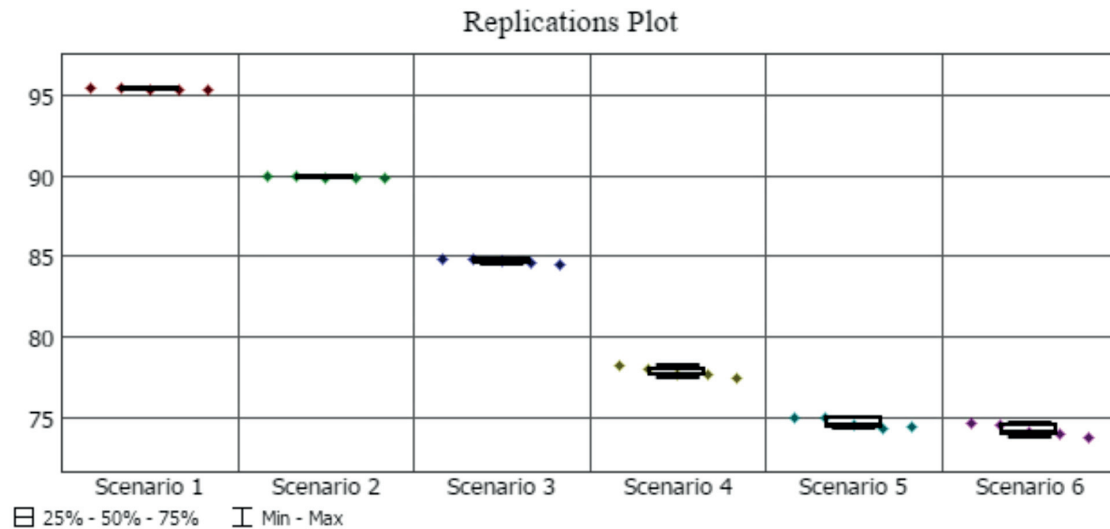
wpływa odległość transportu. Do przygotowania scenariuszy symulacyjnych wybrano różne pojemność skrzyni transportowych wozideł.

Aby w pełni monitorować zmienność poszukiwanego parametru, w zależności od ustawień pozostałych elementów układu, poza obiektami 3D w modelu skonstruowano dwie tablice informacyjne (rys. 4). Pierwszą bezpośrednio w przestrzeni trójwymiarowej, jako obiekt 3D zlokalizowany obok układu kruszącego, drugą natomiast jako panel informacyjny (*dashboard*), w osobnym oknie programu. Wykorzystanie takich rozwiązań pozwalało na ręczne ustawianie dowolnych parametrów układu produkcyjnego i obserwowanie konsekwencji zmian. Nie pozwalało jednak na automatyczne analizowanie wielu wariantów jednocześnie.

Właściwą analizę symulacyjną wpływu zmienności pojemności skrzyni wozidła wykonano z użyciem narzędzia *experimenter*, dostępnego w aplikacji FlexSim. Narzędzie to umożliwia tworzenie dowolnej ilości wariantów ustawień poszukiwanych parametrów, a następnie automatyczne przeliczenie efektów, które wywołują. W opisywanym modelu zdefiniowano sześć różnych scenariuszy realizacji transportu, określając możliwe wielkości mas przewozowych, zaczynając od najmniejszej (1 pakiet), a kończąc na największej pojemności skrzyni wozidła (6 pakietów). Ustawienia wielkości przewożonego materiału ustalono zmieniając ilość transportowanych jednocześnie pakietów. W konsekwencji transportowane masy wyrażone były jednostką bezwymiarową (od 1 do 6). Można

Tab. 1. Wynik końcowy analizy wariantowej scenariuszy pracy jałowej układu kruszącego
 Tab. 1. Final result of variant analysis for crushers idle scenarios

Czas pracy jałowej kruszarki [%]					
warianty	powtórzenia				
	1	2	3	4	5
Scenariusz 1	95,39	95,38	95,36	95,36	95,36
Scenariusz 2	89,98	89,92	89,84	89,87	89,82
Scenariusz 3	84,81	84,78	84,64	84,59	84,51
Scenariusz 4	78,22	77,93	77,59	77,66	77,38
Scenariusz 5	74,97	74,98	74,55	74,31	74,37
Scenariusz 6	74,62	74,51	74,04	73,94	73,76



Rys. 5. Wykres zmienności parametru poszukiwanego w oknie narzędzia „Experimenter” dla wszystkich zdefiniowanych scenariuszy
 Fig. 5. Changeability diagram of searched parameter for every defined scenarios in „Experimenter” tool

jednak opisywanym pakietom nadać jednostki zgodnie z przyjętą logiką procesu oraz zapotrzebowaniem na wyniki (np. 1 pakiet = 1 Mg, lub 1 pakiet = 10 Mg). Dodatkowo, określono globalnie liczbę powtórzeń uruchamiania pojedynczego wariantu, celem zbadania granic zmienności wyników, będących efektem wykorzystania w modelu zmiennych losowych. Każdy scenariusz uruchamiany był 5-krotnie (rys. 5).

Wyniki analizy

W przeprowadzanej analizie poszczególne scenariusze dotyczyły tylko i wyłącznie zmian możliwości transportowych wozidła. Pozostałe parametry zaprojektowanego środowiska produkcyjnego pozostawały bez zmian (ilość i prędkość maksymalna samochodów, harmonogram odpajania kopaliny oraz jej ilość, wydajność kruszarki itp.). Materiał do przewiezienia generowany był według, wspólnie dla wszystkich scenariuszy, zaprojektowanego harmonogramu i uwzględniał utworzenie 4 równych zbiorów po 10 pakietów każdy (odpowiednik 4 sektorów eksploatacyjnych), w równych odstępach czasu. Wyniki analizy wariantów przedstawione zostały w raporcie wygenerowanym przez narzędzie *experimenter* (tab. 1). Pokazuje on jednoznacznie, iż najwięcej pracy jałowej wykonuje kruszarka w momencie wykorzystania najmniejszej pojemności skrzyni transportowej wozidła (przewiezienie jednorazowo 1 pakietu). Uzyskane wartości zawierają się w przedziale 95,36 do 95,39 % całkowitego czasu pracy kruszarki. Najniższe wartości jałowego czasu pracy zarejestrowano dla największej ładowności skrzyni

(przewożenie 6 pakietów), zawierające się w przedziale od 73,76 do 74,62 % całkowitej pracy urządzenia.

Wynik analizy potwierdza dość oczywisty wniosek: im pojemność skrzyni wozidła jest większa, tym większa jest ilość materiału transportowanego w danym czasie, co bezpośrednio przekłada się na czas efektywnej pracy układu kruszącego, przy takiej samej wydajności kopalni i liczbie samochodów. Bez zastosowania symulacji, dla danych warunków terenowych, oszacowanie bezpośredniego wpływu różnic pojemności skrzyni wozidła na efektywność procesu może być bardzo trudne do przeprowadzenia. Skonstruowany model symulacyjny pozwala określić ten parametr precyzyjnie.

Warto również zauważyć (rys. 5), iż dla dwóch ostatnich wariantów ustawień produkcji (scenariusz 5 i 6) zmiana pojemności skrzyni transportowej wozidła nie wpłynęła na znaczną zmianę wielkości pracy jałowej układu kruszącego (różnica między 0,35% a 0,61%). Wskazuje to niezbicie, iż wpływ pojemności skrzyni na sterowanie pracą jałową osiągnął wartość najwyższą. Dalsze przestoje pracy kruszarki zależą już zatem tylko od harmonogramowania robót strzałowych poszczególnych sektorów. Duże wartości końcowe udziału pracy jałowej bezpośrednio pokazują, że odstępy czasowe pomiędzy urabianiem poszczególnych partii ściany są zbyt duże w stosunku do czasu pracy kruszarki.

Podsumowanie

Analiza przykładowego modelu produkcji górniczej i rezultatów symulacji pokazuje, że proponowane podejście symulacyjne może nie tylko skutecznie wspomagać proces projektowania układów produkcyjnych w górnictwie, ale również istotnie ułatwiać zarządzanie eksploatacją złoża. Możliwość konstruowania precyzyjnie dopasowanych do warunków danej kopalni modeli, umożliwiłoby analizę zmian systemu eksploatacji, jak również prognozowanie produkcji w zmieniającym się środowisku rynkowym. Możliwość czytelnej oceny wpływu parametrów produkcyjnych oraz precyzyjne lokalizowanie ich składowych może skutecznie wspomagać procesy decyzyjne dotyczące optymalizacji układów produkcyjnych. Należy tu wspomnieć, że możliwość wykonywania analiz wariantowych opisanych w artykule, to nie jedyne narzędzia wspomagające podejmowanie decyzji. Równie ciekawym komponentem aplikacji FlexSim jest moduł *optimizer*, który dzięki zaimplementowanym algorytmom optymalizacyjnym, sam wyszukuje optymalne wartości parametrów danego układu. Niestety, moduł ten nie był dostępny w aplikacji udostępnionej do realizacji prac badawczych i przetestowanie jego funkcjonalności było niemożliwe.

Modelowanie produkcji górniczej w wirtualnym, wektorowym środowisku 3D, pozwala na precyzyjną lokalizację obiektów dynamicznie zmieniających położenie (np. samochody). Umożliwia to wykorzystanie wyników symulacji również w innych środowiskach analitycznych, operujących na danych przestrzennych, takich jak technologie GIS (Chęciński 2014). Jednocześnie możliwość tworzenia trójwymiarowej reprezentacji złoża oraz ilustrowania przebiegu procesów produkcyjnych i transportowych pozwala na konsekwentną realizację idei „wirtualnej kopalni”, która stanowi najnowszy trend badawczy oraz

rozwojowy światowego górnictwa (Jurdiak, Kawalec 2013).

Należy jednak pamiętać, iż omawiana technologia nie jest pozbawiona wad. Główną przeszkodą w jej szerszym wykorzystaniu w Polsce w warunkach obniżonego popytu na surowce skalne i dużej konkurencji z uwagi na wolne moce przerobowe jest wysoka cena licencji w wersji komercyjnej. Z drugiej strony korzyści z optymalizacji mogą wielokrotnie przekraczać koszty tej licencji – zwłaszcza, że nie jest ona kupowana do stworzenia tylko jednego modelu. Sensowne wydaje się, by w narzędzia tego typu wyposażały się biura projektowe i konsultanci, gdyż samo tworzenie modelu symulacyjnego wymaga od projektanta bardzo szczególnych kompetencji, takich jak modelowanie obiektów trójwymiarowych, programowanie zorientowane obiektowo, znajomości zagadnień z zakresu symulacji oraz w przypadku omawianej tematyki, również górnictwa. Wszystko to sprawia, iż specjalistów mogących realizować tego typu projekty może być względnie niewiele. Obsługa aplikacji niestety również nie należy do najprostszych. O ile możliwe jest szybkie konstruowanie podstawowych modeli bazujących na dostępnych bibliotekach obiektów, to konstruowanie zaawansowanych modeli branżowych może być wyzwaniem, nawet dla średniozaawansowanego użytkownika.

Przyszłość rozwiązań symulacyjnych w Polsce zależeć będzie od pierwszych wdrożeń tego typu aplikacji w przemyśle oraz racjonalnego oszacowania, płynących ze stosowania takich rozwiązań, zysków. Ocena efektywności wdrożenia symulacyjnych modeli 3D wydaje się kluczowa dla dalszego ich rozwoju w kraju. Światowe górnictwo korzysta z nich w coraz szerszym zakresie, o czym świadczy partnerstwo firmy FlexSim Software Products z górniczą firmą konsultacyjną RungePincockMinarco (RPM) (<https://www.flexsim.com/flexsim-partners-with-mining-giant-rpm-for-truck-haulage-simulation/>).



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Zadanie współfinansowane ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Literatura

- [1] Beaverstock M, Greenwood A., Lavery E., Nordgren W., *Symulacja stosowana: modelowanie i analiza przy wykorzystaniu FlexSim*. Orem 2011
- [2] Chęciński S., *Symulacje kształtowania się kongestii w transporcie surowców skalnych*. Gospodarka Materiałowa & Logistyka, nr 6, 2014
- [3] Chęciński S., *Simulation analysis of traffic congestion in mineral mining transport. Process simulation and optimization in sustainable logistics and manufacturing*, Springer, cop. 2014
- [4] Jurdiak L., Kawalec W., *Wykorzystanie nowoczesnych narzędzi informatycznych do optymalizacji funkcjonowania kopalni odkrywkowej ze szczególnym uwzględnieniem systemu transportu taśmowego*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, tom 23, 2007
- [5] Jurdiak L., Kawalec W., 2010. *Nowe trendy w górnictwie - wirtualna rzeczywistość i symulacje*. Kruszywa nr 1, 2013
- [6] Witt A, *Możliwości zastosowania innowacyjnych układów wyposażonych w mobilne maszyny krusząco – sortujące i transportowe w polskim górnictwie skalnym*, Górnictwo Odkrywkowe, nr 6 2011
- [7] Pawlewski, P., *Technologie informatyczne używane w symulacji procesów logistycznych*, Logistyka, nr 1, 2010