

Pośrednia analiza fragmentacji urobku otrzymanego w wyniku robót strzałowych wykonywanych w kopalni dolomitu

The indirect method of analysis of output's fragmentation obtained during blasting in the dolomite open pit mine



Dr inż. Andrzej Biessikirski^{*)}



Mgr inż. Michał Dworzak^{*)}



Dr inż. Józef Pyra^{*)}

Treść: W artykule przedstawiono pośredni sposób oceny fragmentacji urobku z wykorzystaniem metody fotogrametrycznej na podstawie sporządzonej dokumentacji fotograficznej, przy użyciu programu komputerowego Split desktop 2.0. Analizę wykonano w oparciu o dane uzyskane z robót strzałowych prowadzonych z zastosowaniem metody długich otworów w jednej z kopalni dolomitu zlokalizowanych w województwie małopolskim.

Abstract: This paper presents the indirect method of the output's fragmentation assesment. The fragmentation assessment was made in the Split Desktop 2.0. software, based on the photographic documentation which was taken after the blasting works. Data was obtained from blasting in the long boreholes in one of the dolomite open pit mine which is located in the province of Małopolska.

Słowa kluczowe:

fragmentacja, krzywa składu ziarnowego, Split Desktop 2.0, roboty strzałowe

Key words:

fragmentation, cumulative size distribution, Split Desktop 2.0, blasting works

1. Wprowadzenie

Roboty strzałowe stanowią jeden z podstawowych etapów produkcyjnych kopalni surowców skalnych, w wyniku którego możliwe jest uzyskanie wstępnie rozdrobnionej skały przeznaczonej do dalszych procesów przerobczych bądź obróbczych [1]. Efektywność prowadzonych robót strzałowych oceniana jest między innymi przez pryzmat ilości otrzymanego urobku, ale i jego fragmentacji. Cechy te nie są bez znaczenia przy doborze maszyn ładujących, transportujących, przerobczych, a także przy synchronizacji całego układu technologicznego kopalni. W zależności od danego działu gospodarki będącego odbiorcą gotowego produktu, pożądany stopień rozdrobnienia urobku może być odmienny. Dla przykładu, idealna charakterystyka rozdrobnienia urobku produkowanego jako kamień drogowy związana jest z uzyskaniem maksymalnie równomiernej granulacji, przy niewielkim udziale brył nad-

wymiarowych, oraz frakcji najdrobniejszych. Przyjmuje się, że frakcja najdrobniejsza zawiera się w przedziale wielkości ziaren $0 \div 4,75$ mm, zaś bryły nadwymiarowe powyżej 700 mm (uzależnione jest to od parametrów kruszarki wstępnej) [3]. Dodatkowo, wielkość rozdrobnienia urobku stanowi ważną informację wpływającą bezpośrednio na dobór optymalnych parametrów siatki strzałowej [5].

Parametry, które wpływają na fragmentację urobku można podzielić na dwie zasadnicze grupy. Pierwszą stanowią wielkości związane z techniką wykonywania robót strzałowych, a mianowicie parametry geometryczne robót strzałowych, właściwości strzelnicze stosowanych materiałów wybuchowych, konstrukcja ładunków oraz zastosowane opóźnienia międzystrzałowe. Do drugiej grupy zaliczyć można specyficzne cechy ośrodka geologicznego, w którym prowadzone są roboty strzałowe.

Ocenę rozdrobnienia urobku można przeprowadzić na podstawie analitycznych metod pośrednich oraz w sposób bezpośredni. Analiza bezpośrednia (analiza sitowa) uważana jest za najdokładniejszą metodę oceny faktycznego stopnia

^{*)} AGH w Krakowie

rozdrobienia urobku, jednak biorąc pod uwagę ilość koniecznego do przeanalizowania urobku, czasochłonność wykonywanych badań oraz czynnik ekonomiczny, metoda ta staje się mało praktyczna [6]. Z tego względu, metody pośrednie, w tym empiryczne, np. zależność Kuznetsova, Cunninghama, jak również komputerowe wspomaganie oceny rozdrobnienia urobku z wykorzystaniem specjalistycznych aplikacji, znajduje szerokie zastosowanie w przypadku wykonywania tego rodzaju ocen [4,7, 8].

2. Opis stanowiska pomiarowego

Analizę rozdrobnienia urobku przeprowadzono dla jednej z kopalń odkrywkowych dolomitu zlokalizowanej w województwie małopolskim, której eksploatowane złożo charakteryzowało się niewielką zmiennością litologiczną. Analizę rozdrobnienia wykonano z wykorzystaniem programu Split Desktop 2.0. na podstawie sporządzonej dokumentacji fotograficznej. Parametry robót strzałowych (m.in. geometrię siatki otworów strzałowych, wielkości ładunków) oraz metodykę badawczą przedstawiono w dalszej części artykułu.

2.1. Parametry robót strzałowych

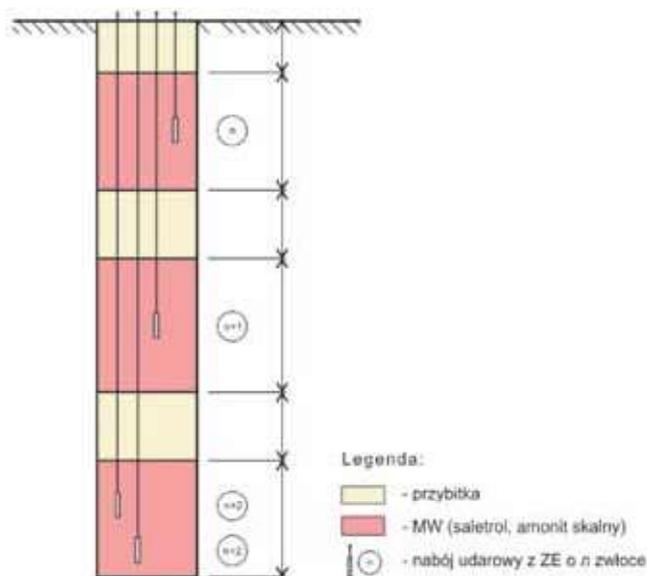
Serię otworów strzałowych, w wyniku której uzyskany został analizowany pod względem fragmentacji urobek, odpalono zgodnie z parametrami przedstawionymi w tabeli 1. W tabeli 2 przedstawiono zużycie środków strzałowych w analizowanej serii.

Zastosowany podczas robót strzałowych materiał wybuchowy (saletrol) został sporządzony samodzielnie przez służbę strzałową kopalni z 12 kg oleju napędowego oraz 225 kg saletry amonowej. W celu zainicjowania detonacji materiału wybuchowego zastosowano zapalniki elektryczne GZE M 0.45A M-25 (1-18) w liczbie 24 sztuk, zaś ładunki udarowe sporządzono z naboju amonitu skalnego – As H3E (6 kg).

Otwory strzałowe rozmieszczone były w jednym szeregu. Ładunek MW w każdym otworze był dzielony na trzy części, a inicjowany od strony wlotu otworu (zgodnie ze szkicem konstrukcji ładunków MW przedstawionym na rys. 1). Opóźnienia między otworami wynosiły 25 ms.

2.2. Metodyka badawcza

Ocena rozdrobnienia urobku została wykonana z wykorzystaniem programu komputerowego SPLIT Desktop 2.0. Pierwszym etapem prac było sporządzenie niezbędnej dokumentacji fotograficznej zgodnie z zaleceniami opisanymi w pracach [2, 3, 6, 10]. Etap ten jest szczególnie ważny, gdyż



Rys. 1. Szkic konstrukcji ładunku materiału wybuchowego
Rys. 1. Construction of the explosive charge in the borehole

bezpośrednio wpływa na ostateczny rezultat analiz. Fotografie wykonano w sposób sekwencyjny w niewielkiej odległości od usypu, a urobek znajdował się w płaszczyźnie prostopadłej do obiektywu aparatu. Należy zaznaczyć, iż istotny wpływ na rezultat wykonywanych analiz mogą mieć warunki pogodowe w trakcie wykonywania dokumentacji fotograficznej. Mają one znaczenie zwłaszcza w przypadku zastosowania metody automatycznej delinearacji (lokalne zachmurzenie oraz wyraźne zmiany natężenia światła mogą wpływać na ilość „szumów”). Z powyższego względu zdjęcia wykonane zostały w dobrych warunkach pogodowych (poranek, brak zachmurzenia, niezbyt ostre światło). Jak już wcześniej wspomniano, fotografie wykonywano w sposób sekwencyjny, w wyniku czego analizowany usyp urobku został podzielony na 8 sektorów badawczych (rys. 2).

Otwór włomowy umiejscowiony był jako pierwszy z prawej (rys. 2) odpalanej serii.

Jak widać na rys. 2, sektory badawcze zostały zagęszczone w centralnej części usypu. Wynika to z zauważalnie dużej zmienności występujących w tym miejscu frakcji, co wymaga zwiększenia poziomu dokładności podczas wykonywania delinearacji (okonturowania) urobku. Dla każdego sektora badawczego wykonano po 10 zdjęć, z których następnie wyselekcjonowano po 5, celem poddania późniejszej analizie fotogrametrycznej. Po załadowaniu zdjęcia, program SPLIT Desktop 2.0 samodzielnie dostosowuje fotografię do dalszej analizy poprzez reprezentację kolorów do skali szarości

Tablica 1. Rzeczywiste parametry serii pomiarowej

Table 1. Blasting pattern parameters

Liczba otworów strzałowych n	Średnica otworów strzałowych d	Odległość między otworami a	Zabór otworów z	Przewiert lp	Wysokość ściany H
szt.	mm	m	m	m	m
6	105	3	3	1	10

Tablica 2. Rzeczywiste zużycie środków strzałowych

Table 2. Effective use of explosive charges

Maksymalny ładunek w serii robót strzałowych	Maksymalny ładunek w otworze strzałowym	Maksymalny ładunek przypadający na opóźnienie międzysrzalowe	Liczba zastosowanych zapalników milisekundowych
kg	kg	kg	szt.
243	41	15	24



Rys. 2. Analizowane sektory usypu
Fig. 2. Analyzed output sectors

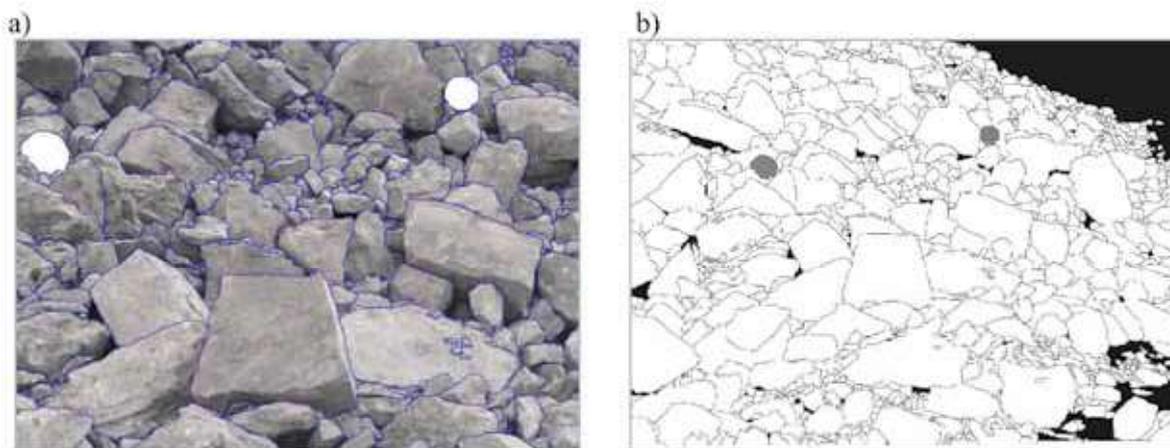
w różnym natężeniu. W pierwszym etapie analizy użytkownik rozpoczyna skalowanie obrazu poprzez umieszczenie kulistego obiektu o znanym rozmiarze w miejscu wykonywanej analizy (w przypadku przeprowadzanych badań była to piłka do koszykówki o średnicy 238,6 mm). Następnie wybrany zostaje typ analizy do przeprowadzenia (*dual object* - tzw. „podwójny obiekt”, umożliwia ona skalowanie wielkości urobku poniżej i powyżej średnicy punktu odniesienia). Program SPLIT Desktop 2.0. umożliwia przeprowadzenie automatycznej delinearacji analizowanego urobku i wykonanie oceny większych ziaren [11].

W przypadku stosowania automatycznej delinearacji należy zwrócić uwagę na trzy podstawowe parametry, a mianowicie: wielkość szumu, wielkość podziału oraz współczynnik gradientu. Parametr określający wielkość szumu służy do wyznaczenia wielkości (w pixelach) najmniejszego analizowanego zgrupowania określonego przez algorytm programu. Wielkość podziału charakteryzuje ilość wykonanych przez algorytm programu podziałów, służących w szczególności do wykonywania dodatkowych delinearacji urobku. Dodatkowe okonturowanie jest uzależnione od kształtu ziarna. Współczynnik gradientu jest numerycznym określeniem zmiany natężenia koloru w skali szarości (od jasnego do ciemnego).

Zwiększenie bądź zmniejszenie tego współczynnika powoduje odpowiednio wygenerowanie większej lub mniejszej ilości linii granicznych. Wynikiem przeprowadzonych analiz jest uzyskanie różnych form krzywych składu ziarnowego (np. liniowa-liniowa, logarytmiczno-liniowa, logarytmiczno-logarytmiczna oraz Rosin-Rammler). Oczekiwany poziom istotności analizy odnoszący się do możliwego rozdrobnienia urobku wymusił wykonanie delinearacji urobku w sposób manualny, czego celem było uzyskanie jak największej dokładności wyników analizy [11]. Przykładowe okonturowanie urobku dla części sektora 1 przedstawiono na rys. 3a. Na rys. 3b można zauważyć przetworzoną przez program Split Desktop 2.0. fotografię sektora nr 1.

2.3. Wyniki analizy rozdrobnienia

Jak wspomniano w punkcie 2.2., ocenę fragmentacji urobku powstałego w wyniku robót strzałowych sporządzono w ośmiu częściach na podstawie fotografii cyfrowych, które podzieliły usyp urobku na sektory badawcze. Dla każdego z sektorów dokonano analizy fragmentacji urobku z wykorzystaniem programu Split Desktop 2.0. na podstawie 5 zdjęć wykonanych z różnych punktów, których wyniki uśredniono,



Rys. 3. Delineacja sektora I: a) ogólny widok, b) widok przetworzony przez program Split Desktop 2.0
Fig. 3. Delineation of sector no. 1 a) general view, b) view processed by the Split Desktop 2.0

Tablica 3. Suma procentowych udziałów wielkości ziaren urobku dla poszczególnych fotografii sektora nr 2
Table 3. Sum of percentage share in the output particle size for each photo taken in the sector no. 2

Graniczny rozmiar ziarna, mm	Suma procentowych udziałów wielkości ziaren dla poszczególnych fotografii sektora nr 2 %					Wartość średnia %
< 4,75	2,55	2,01	4,56	4,02	3,26	3,46
< 6,70	2,65	2,79	5,79	5,79	4,21	4,65
< 9,50	5,26	3,87	7,29	5,80	5,46	5,61
< 13,20	6,01	5,27	9,29	8,32	6,99	7,47
< 19,00	7,36	7,38	11,97	11,65	9,17	10,04
< 26,50	13,14	10,00	15,08	11,38	11,74	12,05
< 37,50	13,22	13,66	19,19	18,82	15,20	16,72
< 53,00	21,20	18,50	24,37	20,51	19,64	20,76
< 75,00	27,01	24,80	30,98	27,12	25,40	27,08
< 100,00	32,59	31,29	37,77	34,40	31,42	33,72
< 125,00	42,89	36,67	44,04	35,38	36,67	38,19
< 250,00	62,27	62,27	70,53	67,75	62,27	65,71
< 500,00	94,29	93,14	96,59	94,29	93,14	94,29
< 750,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

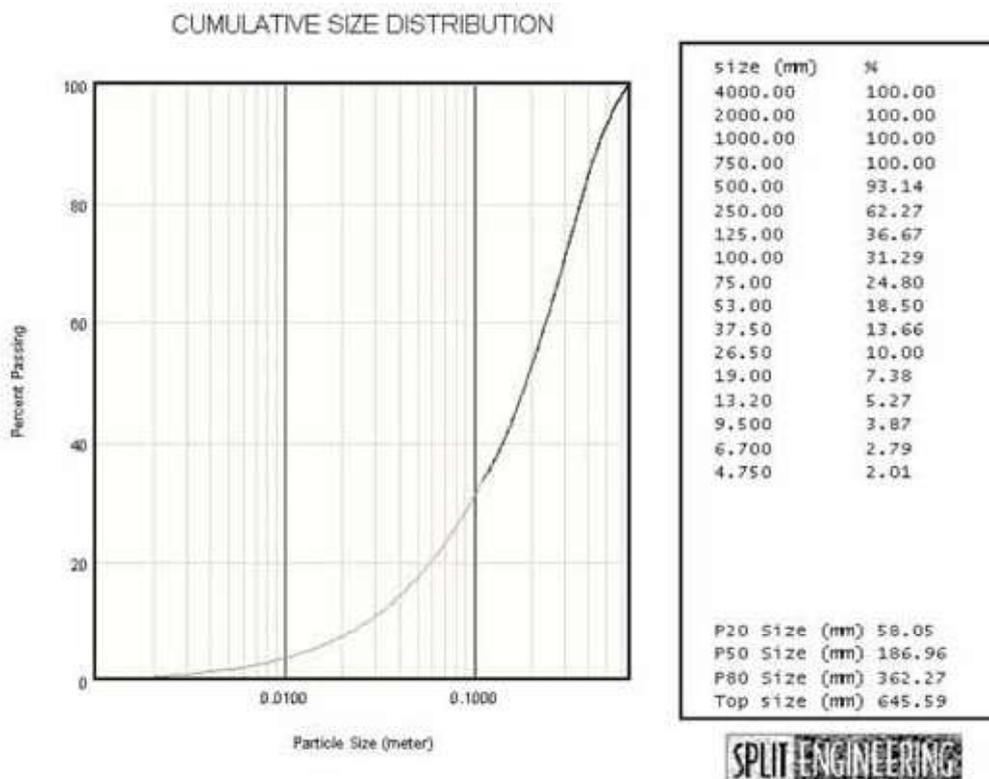
uzyskując tym samym krzywą składu ziarnowego danego sektora badawczego. W celu uogólnienia wyników fragmentacji urobku, otrzymane dla poszczególnych sektorów wyniki poddano uśrednieniu, otrzymując tym samym ogólną ocenę fragmentacji całości otrzymanego w wyniku robót strzałowych urobku. Przykładową krzywą składu ziarnowego dla pojedynczej analizy sektora 2 przedstawiono na rys. 4. Wartości fragmentacji uzyskane z każdego analizowanego zdjęcia dla sektora 2 przedstawiono w tabeli 3.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można zauważyć brak występowania nadgabarytów (frakcji powyżej 700 mm) w usypie. Średnica największego ziarna jest równa ok. 645,00 mm.

Podobne kroki postępowania wykonano dla każdego z analizowanych sektorów.

Średnią wartość fragmentacji dla każdego analizowanego sektora oraz uzyskaną średnią krzywą składu ziarnowego dla poszczególnych sektorów oraz dla całej serii przedstawiono w tabeli 4 oraz na rys. 5a i 5b.

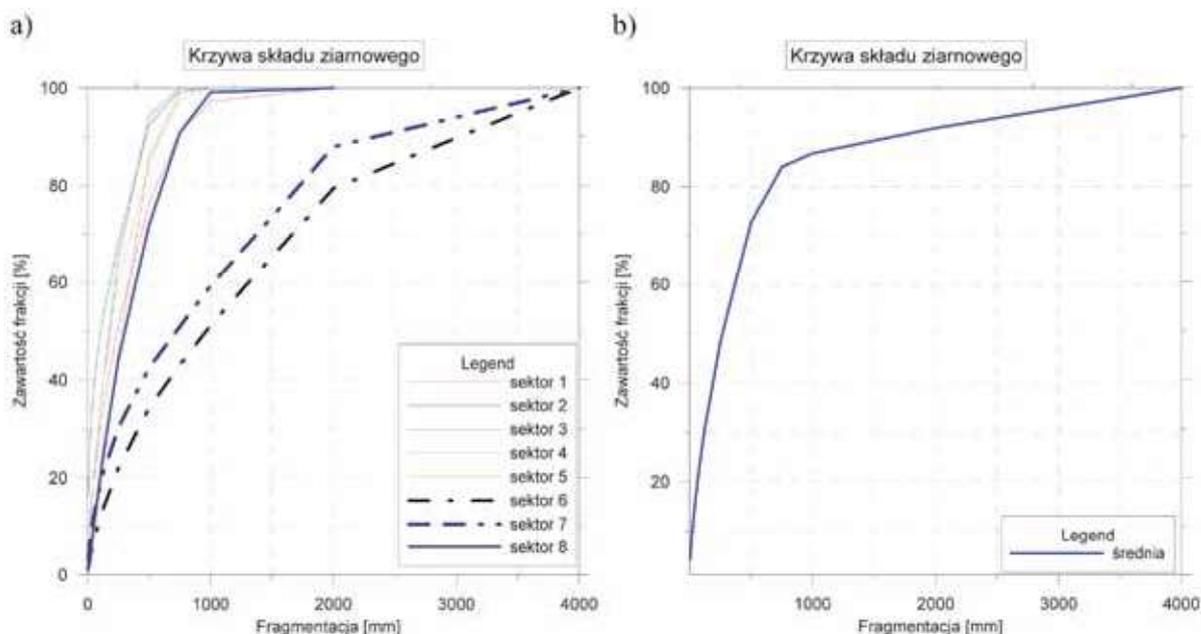
Jak można zauważyć na rys. 5a, wyniki analizy składu ziarnowego dla sektorów 1 – 5 oraz sektora 8 są do siebie zbliżone i charakteryzują się procentowym wychodem brył nadwymiarowych na poziomie od 0,5% (dla sektora 3) do 9,2% (dla sektora 8). Wyjątek stanowi sektor 2, w którym nie wystąpiły frakcje powyżej 700 mm. Dodatkowo, krzywe składu ziarnowego urobku występującego w sektorach 6



Rys. 4. Wynik pojedynczej analizy fragmentacji urobku dla sektora nr 2
Fig. 4. Single cumulative size distribution for the sector no. 2

Tablica 4. Średni procentowy udział wielkości ziaren urobku dla wszystkich sektora
Table 4. Average percentage share in the output particle size for all sectors

Graniczny rozmiar ziarna, mm	Suma procentowych udziałów frakcji dla poszczególnych sektorów badawczych								Wartość średnia
	%								
< 4,75	5,02	3,28	16,21	0,34	2,77	1,22	3,07	0,87	4,10
< 6,70	6,08	4,26	18,34	0,54	3,7	1,57	3,74	1,25	4,94
< 9,50	7,4	5,54	20,8	0,84	4,99	2,02	4,58	1,81	6,00
< 13,20	8,91	7,18	23,45	1,29	6,59	2,57	5,54	2,56	7,26
< 19,00	11,03	9,51	26,78	2,07	8,99	3,38	6,89	3,74	9,05
< 26,50	13,43	12,27	30,24	3,18	11,88	4,34	8,41	5,27	11,13
< 37,50	16,52	16,02	34,32	4,97	15,8	5,63	10,34	7,52	13,89
< 53,00	20,32	20,84	38,93	7,72	20,85	7,27	12,7	10,65	17,41
< 75,00	25,01	27,06	44,16	11,92	27,26	9,39	15,55	15	21,92
< 100,00	29,71	33,49	49,01	16,93	33,68	11,57	18,34	19,78	26,56
< 125,00	33,94	39,13	53,12	22,04	39,38	13,57	20,79	24,35	30,79
< 250,00	51,27	65,02	68,19	45,7	60,33	21,95	30,24	44,06	48,35
< 500,00	76,53	94,29	92,51	85,59	84,39	34,31	42,52	71,83	72,75
< 750,00	90,99	100,00	99,4	99,04	97,62	43,08	50,91	90,78	83,98
< 1000,00	97,26	-	100	100	100	51,17	59,24	99,16	86,69
< 2000,00	100	-	-	-	-	79,44	87,96	100	91,85
< 4000,00	-	-	-	-	-	100	100	-	100,00



Rys. 5. Krzywe składu ziarnowego: a) w poszczególnych sektorach, b) całej serii
Fig. 5. Cumulative size distribution: a) in each sector, b) for the whole series

oraz 7 odbiegają swoją charakterystyką od tendencji zauważalnej dla pozostałych sektorów badawczych. Rozbieżność ta spowodowana jest istotnym wzrostem zawartości frakcji nadgabarytowych w stosunku do pozostałych sektorów (odpowiednio: dla sektora 6 – 57%, a dla sektora 7 – 49%). Sektory te zlokalizowane są w centralnej części usypu, a znaczący procent frakcji nadgabarytowych może być spowodowany odmienną podzielnością masywu w strefie centralnej. Na rys. 5b zauważa się, że nadgabaryty stanowią ok. 16% całego urobku. Obserwuje się również wzrost rozdrobnienia urobku (od średnicy ziarna 75 mm) skorelowany wraz ze wzrostem odległości od obszaru włomowego (sektory 6, 7, 8). W wyniku obecności przybitki wewnątrztorowej, w rejonie górnej części usypu można zauważyć występowanie dużej zawartości frakcji najdrobniejszych (sektor nr 3). Dodatkowo

należy zaznaczyć, iż największa ilość frakcji najdrobniejszej znajduje się w rejonie włomowym analizowanej serii, a więc w sektorach nr 1, 2 oraz 3.

3. Wnioski

Zastosowanie programów komputerowych może stanowić pomocne narzędzie do oceny efektów wykonywanych robót strzałowych, jednak niemożność dostosowania przedziałów rozmiaru ziarna w programie *Split Desktop 2.0* stanowi ograniczenie użytkowe oprogramowania.

Program *Split Desktop 2.0* został wykorzystany do wykonania analizy fotogrametrycznej. Na podstawie przeprowadzonych badań zauważa się, że:

- wyniki analizy składu ziarnowego dla sektorów 1 – 5 oraz sektora 8 są ze sobą zbieżne,
- zawartość frakcji najdrobniejszej (wielkość ziarna do 4,75 mm) jest największa w obszarach, w których przed odpaleniem serii znajdował się materiał wykorzystywany do sporządzenia przybitki (sektor 3). Szczególnie dużo tego materiału znajdowało się w rejonie otworu włomowego (sektory 1, 2 oraz 3),
- zauważalne jest zmniejszenie stopnia rozdrobnienia urobku wraz ze wzrostem odległości od otworu włomowego,
- uzysk frakcji nadgabarytowych (powyżej 700 mm) w analizowanej serii wynosi około 20%. Ilość ta może być spowodowana budową geologiczną złoża. Trudno również wykluczyć wpływ zmienności właściwości zastosowanego materiału wybuchowego, jednak potwierdzenie tego można by było uzyskać poprzez wykonanie pomiaru prędkości detonacji w każdym z otworów serii.

Zaznacza się, że otrzymane wyniki fragmentacji urobku należy traktować z pewną rezerwą, ponieważ analizowano tylko urobek zlokalizowany na zewnętrznej powierzchni usypu. Przypuszcza się, że dokonanie uśrednienia urobku lub wykonanie analizy urobku zlokalizowanego wewnątrz usypu spowodowałyby otrzymanie odmiennych od przedstawionych w artykule wyników w postaci krzywych składu ziarnowego.

Literatura

1. *Batko P., Modrzejewski S.*: Nowoczesne środki strzałowe i techniki urabiania w górnictwie odkrywkowym. „Przeгляд Górnicy” 2001, nr 4, s. 14-21.
2. *Batko P., Soltys A.*: O sposobach określania składu ziarnowego urobku po strzelaniu. Magazyn WUG - „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” 2007, nr 9/1, s. 5 -8;
3. *Biessikirski A., Biessikirski R.*: Wpływ warunków geologiczno-górnicych na fragmentację urobku w kopalniach wapienia. Magazyn WUG - „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” 2012, nr 12, s. 18 - 27.
4. *Cunningham C.V.B.*: The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting”; Materiały konferencyjne The 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Lulea, Sweden 1983, p. 439 – 453.
5. *Engin I.C.*: A practical method of bench blasting design for desired fragmentation based on digital image processing technique and Kuz-Ram model. The 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting; Granada, Spain 2009. p. 257 – 263.
6. *Esen S., Bilgin, H.A.*: Effect of Explosive on Fragmentation - material internetowy: ([http://www.metsominerals.com/inetMinerals/mm_proc.nsf/WebWID/WTB-060320-2256F60F1C/\\$File/esen_fragmentation_2001.pdf](http://www.metsominerals.com/inetMinerals/mm_proc.nsf/WebWID/WTB-060320-2256F60F1C/$File/esen_fragmentation_2001.pdf)).
7. *Farmarzi F., Mansourin H., Ebrahimi Farsangi M.A.*: A rock engineering systems based model to predict rock fragmentation by blasting. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, no 60, p. 82 – 94.
8. *Kuznetsov V. M.*: The mean diameter of fragments formed by blasting rock. Journal of Mining Science, 1973, no 9 , p. 144 –148.
9. PN-B-02480:1986
10. *Siddiqui F.I., Ali Shah S.M., Behan M. Y.*: Measurement of Size Distribution of Blasted Rock Using Digital Image Processing. Journal of King Abdulaziz University, rok 2009, vol. 60, Vol. 20, nr. 2, p. 81-93.
11. Split Desktop 2.0 – instrukcja obsługi.

Zwiększajmy prenumeratę najstarszego – czołowego miesięcznika Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa!

Liczba zamawianych egzemplarzy określa zaangażowanie jednostki
gospodarczej w procesie podnoszenia kwalifikacji swoich kadr!