

Analiza kosztów środków strzałowych przy różnym sposobie inicjowania w metodzie strzelania długimi otworami

Cost analysis of blasting agents at various methods of initiation for shooting long holes method

Ryszard Morawa, Krzysztof Barański

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Katedra Górnictwa Odkrywkowego, Kraków, PL

Streszczenie: W pracy porównano zmianę kosztów środków strzałowych dla przyjętego modelu: określonych warunków geologiczno-górnicych, dwóch różnych materiałów wybuchowych, zmiennych parametrów geometrycznych otworu oraz wartości parametrów strzałowych; zakładając prowadzenia prac strzelniczych metodą otworów długich.

Symulacje przeprowadzono dla trzech systemów inicjowania w celu zobrazowania zmian relacji kosztów materiałów wybuchowych do środków inicjujących w zależności od przyjętego systemu. Ponadto przedstawiono sumaryczne koszty prowadzenia prac strzałowych oraz koszty jednostkowe dla przyjętych założeń. Przedstawiono wnioski dotyczące zmieniających się kosztów prowadzenia prac strzałowych przy różnych sposobach inicjowania i zmieniających się parametrach strzelania.

Abstract: The evaluation of changes in the cost of blasting for adopted model, specific geological and mining conditions, two different explosives, variable parameters and geometric hole blasting parameters, assuming its work by firing long holes was presented.

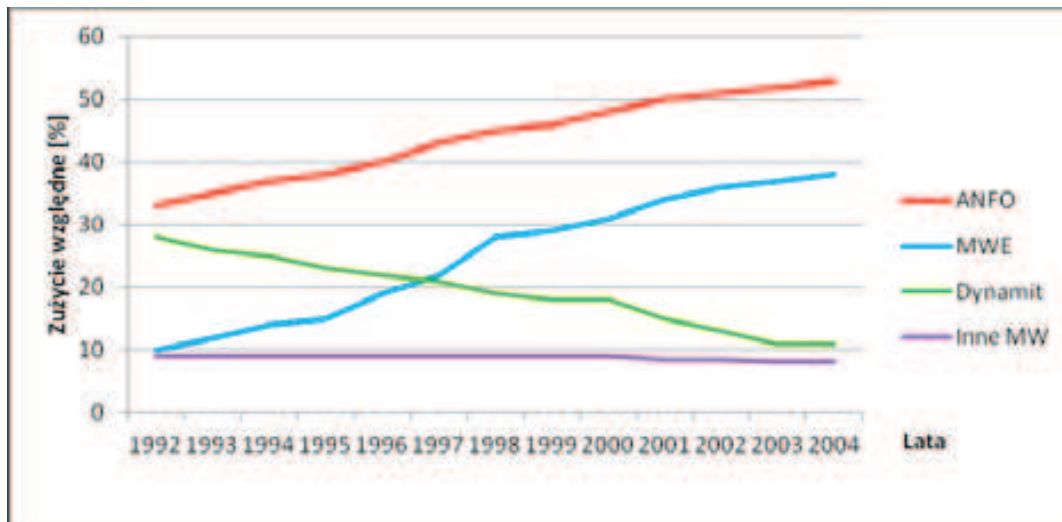
Simulations were performed for three initiating systems to imaging changes in the cost-explosives initiators, depending on a system. Also shows the total cost of doing the work of blasting and unit costs for the assumptions. The conclusions regarding the changing costs of blasting work at different ways of initiating and changing shooting parameters were presented.

Słowa kluczowe: koszty prac strzałowych, prace strzałowe, systemy inicjowania, strzelanie długimi otworami
Key words: costs of blasting, blasting, initiation systems, shooting long holes

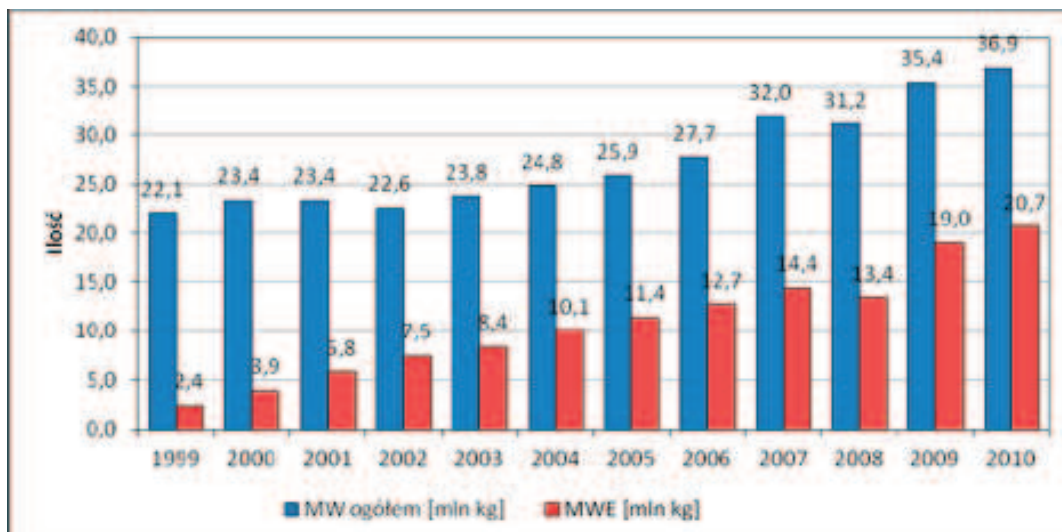
1. Wstęp

W robotach strzałowych w ostatnich latach wprowadza się nowsze i coraz bezpieczniejsze środki strzałowe. Materiały wybuchowe (MW) typu ANFO i emulsyjne (MWE) stanowią obecnie najpowszechniejszą grupę MW wykorzystywanych do urabiania skał w kopalniach odkrywkowych. Jest to podyktowane szeregiem zalet i korzyści jakie wynikają z ich stosowania.

W technice strzelniczej stosowanej w górnictwie zauważalne jest zmniejszające się wykorzystanie MW zawierających nitroestry (dynamit i amonity) oraz rosnący udział nowoczesnych mieszanin tworzonych na bazie saletry amonowej np. saletrol (ANFO), MWE i HEAVY ANFO. Tendencja ta obserwowalna jest w Polsce (rys. 1 i rys. 2) oraz na świecie. Wykres na rysunku 1 wskazuje, że od 1997 roku zużycie MWE przekracza wykorzystanie dynamitu. Natomiast pomimo dwóch istotnych wad MW typu ANFO: niewielka prędkość detonacji oraz brak wodoodporności w dalszym ciągu są najpowszechniej stosowaną grupą MW w Polsce.



Rys. 1. Struktura zużycia różnych MW w latach 1992 ÷ 2004 [1]



Rys. 2. Ilość zużytych w Polskich zakładach górniczych MWE do ilości ogółem w latach 1999 ÷ 2010 [3]

Występujące niekorzystne cechy saletrolu stały się motorem do stworzenia nowoczesnych MW, w których wyeliminowano powyższe mankamenty. W 1964 roku opatentowano MWE typu O/W w których fazą ciągłą jest woda a fazą rozproszoną jest olej. Natomiast w 1969 roku powstały MW typu W/O. Kolejnym etapem rozwoju MWE było zmniejszanie ilości wody w emulsji dzięki czemu powstały MWE typu LWC (Low Water Composition) [2].

MWE spełniają wszystkie wymagania stawiane optymalnym MW. Posiadają następujące korzystne cechy własności [3]:

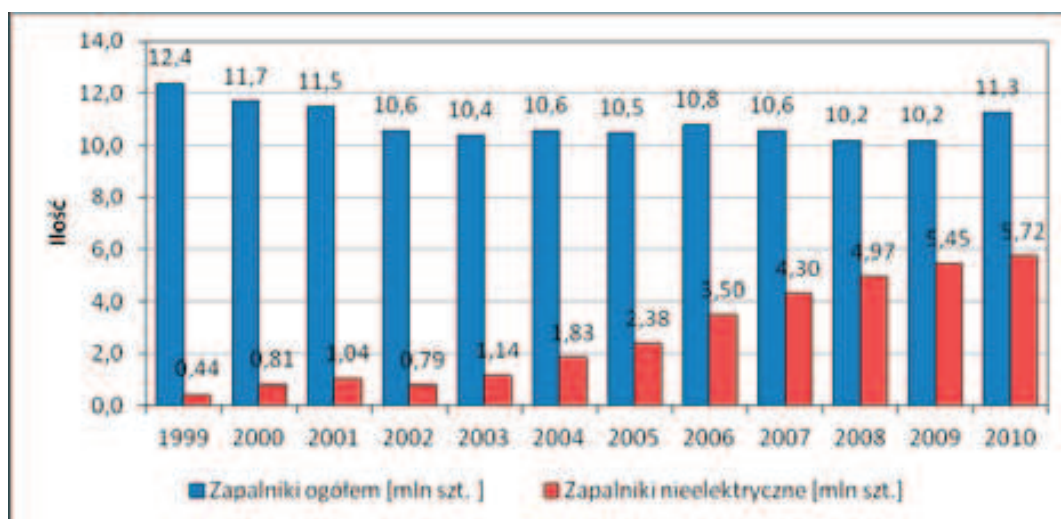
- łatwość i bezpieczeństwo wytwarzania,
- poręczność i pewność stosowania,
- niezawodność działania pod wpływem inicjatora – odpowiednia wrażliwość,
- jednorodność działania podczas wybuchu,
- dostateczna ilość energii zawartej w mieszaninie i odpowiednia siła działania po wybuchu,
- możliwością mechanicznego załadunku i sterowaniem parametrami energetycznymi *in situ*,
- wodoodporność,
- niewielka szkodliwość dla środowiska – odpowiedni skład gazów postrzałowych.

Oraz ponadto:

- relatywnie niższa cena,
- duża dostępność.

Największą zaletą MWE jest uczulenie matrycy bezpośrednio w miejscu wykonywania robót strzałowych, wysoki poziom bezpieczeństwa oraz mechanizacja procesu wykonania MW *in situ* i jego załadunku. Niezależnie od stosowanych systemów mieszalniczo-załadowniczych składniki przewożone w pojazdach transportowych nie posiadają właściwości wybuchowych do momentu ich połączenia i uczulenia w otworze strzałowym. Dlatego przewóz MWE po drogach publicznych jest bezpieczny, a sporadyczne wypadki zdarzają się jedynie w przypadku błędów lub usterek mających miejsce w momencie ładowania otworów strzałowych. Wszystkie powyższe zalety sprawiają, że każda kolejna generacja MWE znacząco przybliża je do określenia mianem idealnych MW.

Do środków inicjujących należą m. in. zapalniki [5]. W technice strzelniczej stosowane są trzy systemy inicjowania: elektryczny, nieelektryczny oraz elektroniczny. Ze względu na złożoność i specyfikę prowadzenia prac strzałowych trudno jednoznacznie ocenić, który z systemów jest najlepszy. Każdy z nich posiada swoje wady i zalety, dlatego obecnie poszukuje się rozwiązań optymalnych w danych warunkach geologiczno-górnictwowych. Ważnym czynnikiem ekonomicznym doboru systemu jest cena zapalników, która dla przedsiębiorstwa działającego w warunkach rynkowych jest głównym wyznacznikiem określającym sposób prowadzenia prac strzałowych. Obecnie w kopalniach odkrywkowych prowadzących eksploatację z wykorzystaniem techniki strzelniczej najpowszechniej stosuje się nieelektryczne systemy inicjowania. Zmiany struktury użycia zapalników elektrycznych i nieelektrycznych w Polskim górnictwie na przestrzeni lat 1999 ÷ 2010 przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Ilość zużywanych w Polskich zakładach górniczych zapalników nieelektrycznych do ilości ogółem w latach 1999 ÷ 2010 [3]

Systemy elektryczne ze względu na niższy stopień bezpieczeństwa i możliwości technologiczne są wypierane przez nowsze rozwiązania jakie oferuje system nieelektryczny. Natomiast stosunkowo niedawno obecne na rynku systemy elektroniczne pomimo licznych zalet oraz wysokiej precyzji opóźnień nie odgrywają w chwili obecnej dużej roli w górnictwie odkrywkowym. Jest to związane z wysokim kosztem zapalników, pozostałych elementów systemu (specjalne zapalarki typu: blaster, programatory – logger) oraz ich serwisem, brakiem kompatybilności poszczególnych elementów systemu różnych producentów. Dlatego systemy elektronicznego inicjowania ładunków stosowane są najczęściej gdy wymagana jest bardzo duża dokładność czasów opóźnień.

2. Założenia obliczeniowe warunków urabiania, budowy geologicznej oraz parametrów: geometrycznych otworu i strzałowych

W celu wykonania oceny kosztów środków strzałowych przygotowano model zakładając zmienne: parametry geometryczne otworu oraz wartości parametrów strzałowych. W modelu przyjęto także określoną budowę geologiczną terenu. Symulacje przeprowadzono dla różnych warunków urabiania w celu zobrazowania zmian

relacji kosztów MW do środków inicjujących. Parametry dobrano dla prowadzenia prac strzelniczych metodą otworów długich, najpowszechniej wykorzystywaną w polskim górnictwie.

Ponieważ koszt zakupu sprzętu strzałowego (głównie zapalarek) ze względu na długą żywotność tych urządzeń można uznać za jednorazowy (niezależnie od systemu inicjowania) w przeprowadzonej analizie kosztów największe znaczenie ma cena zapalników oraz MW. W zależności od systemu inicjowania i długości przewodów ceny zapalników zmieniają się w szerokim zakresie, dlatego koszt tych środków jest kluczowy. Celem symulacji jest zobrazowanie zmiany relacji cen zapalników do ceny MW, przedstawienia sumarycznych kosztów prowadzenia prac strzałowych oraz kosztów jednostkowych w zależności od stosowanych systemów inicjowania, zmieniających się: warunków geologiczno-górnictwowych, rodzajów MW oraz parametrów geometrycznych otworu. Wyniki opracowania posłużą do oceny opłacalności stosowania danego systemu w różnych sytuacjach.

Przyjęto kąt nachylenia otworów strzałowych 80° oraz równoległe położenie osi otworu w stosunku do ociosu. Symulację przeprowadzono dla zmieniających się wartości wysokości ścian: 7 m, 10 m, 12 m, 15 m, 17 m, 20 m i 22 m w celu określenia zmian współczynnika proporcji kosztów MW w stosunku do ceny zapalników przy zmieniającej się długości otworów strzałowych. Analiza przeprowadzona została dla dwóch średnic otworów powszechnie wykorzystywanych w tego typu pracach strzałowych tzn. 85 mm oraz 110 mm. W modelowaniu założono prowadzenie prac strzałowych w skałach wapiennych o spoiwie węglanowym cechujących się gęstością przestrzenną $\rho = 2600 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$. Symulację przeprowadzono dla dwóch wybranych środków strzałowych: MWE – Centra Gold 100 (zwanego dalej w skrócie MWE) i saletrolu – Exan Bulk (zwanego dalej w skrócie ANFO); przedstawiciele grup MW które są najczęściej wykorzystywane w górnictwie odkrywkowym. Parametry strzałowe obu materiałów zostały dobrane na podstawie ich kart charakterystyki podanych przez producenta [6].

Obliczono parametry geometryczne otworu oraz parametry strzałowe według powszechnie stosowanych zależności i wzorów matematycznych. Wyniki zestawiono w tabelach zbiorczych.

Długość otworu strzałowego obliczono ze wzoru:

$$L = \frac{H}{\sin \alpha} + l_{pw} \quad (1)$$

gdzie: L – długość otworu strzałowego [m], H – wysokość ściany [m], α – kąt nachylenia ociosu ściany $[\circ]$, l_{pw} – długość przewiertu [m].

Wartości długość przewiertu l_{pw} oraz ilość potrzebnej przybitki l_p zostały oszacowane na podstawie wzorów określających zależności tych parametrów od średnicy otworu, przyjmując wartości średnie. Zabiór oraz zabiór obliczeniowy wyliczono ze wzorów:

$$Z = \sin \alpha \cdot Z_0 \quad (2)$$

$$Z_0 = \frac{1}{\sin \alpha} \sqrt{\frac{(L - l_p) \cdot c}{H \cdot m \cdot q}} \quad (3)$$

gdzie: Z – zabiór [m], Z_0 – zabiór obliczeniowy [m], L – długość otworu strzałowego [m], α – kąt nachylenia ociosu ściany $[\circ]$, l_p – długość przybitki [m], c – ilość MW mieszcząca się w 1 m otworu $[\text{kg mb}^{-1}]$, H – wysokość ściany [m], m – względna odległość między otworami [m], q – zużycie jednostkowe MW $[\text{kg m}^{-3}]$.

Ilość MW mieszcząca się w 1 m otworu obliczono ze wzoru:

$$c = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \gamma \quad (4)$$

gdzie: c – ilość MW mieszcząca się w 1 m otworu $[\text{kg mb}^{-1}]$, d – średnica otworu [m], γ – gęstość MW $[\text{kg m}^{-3}]$. Odległości między otworami strzałowymi wyliczono ze wzoru:

$$a = m \cdot Z_0 \quad (5)$$

gdzie: a – odległość między otworami strzałowymi [m], m – względna odległość między otworami [m], Z_0 – zabiór obliczeniowy [m].

Następnie obliczono zużycie jednostkowe dla zadanych MW stosując wzór Kutuzowa i Suchanowa [1]:

$$q = 0,13 * \gamma * \sqrt[4]{f} * (0,6 + 3,3 * 10^{-3} * d * d_s) * \left(\frac{0,5}{d_k}\right)^{0,4} * \left(\frac{1000}{Q}\right) \quad (6)$$

gdzie: q – zużycie jednostkowe [kg m^{-3}], γ – gęstość skały [kg m^{-3}], f – wskaźnik zwięzłości według klasyfikacji Protodiakonowa, d – średnica otworu strzałowego [mm], d_s – średnie odległości w masywie górotworu między szczelinami [m], d_k – rozmiar żądanego ziarna [m], Q – ciepło wybuchu MW [kcal kg^{-1}].

Zestawienie obliczonych parametrów geometrycznych otworu oraz parametrów strzałowych prezentują poniższe tabele:

Tab. 1. Zestawienie obliczonych parametrów geometrycznych otworu oraz parametrów strzałowych dla Exan Bulk (ANFO) i średnicy otworu $d = 85$ mm

H [m]	L [m]	Z_0 [m]	Z [m]
7	7,96	2,79	2,75
10	11,00	2,91	2,86
12	13,04	2,95	2,90
15	16,08	2,99	2,94
17	18,11	3,01	2,96
20	21,16	3,03	2,99
22	23,19	3,04	3,00

Parametry stałe dla wszystkich powyższych obliczeń: $c = 4,65 \text{ kg mb}^{-1}$, $l_p = 2,38 \text{ m}$, $l_{pw} = 0,85 \text{ m}$, $q = 0,49 \text{ kg m}^{-3}$.

Tab. 2. Zestawienie obliczonych parametrów geometrycznych otworu oraz parametrów strzałowych dla Centra Gold 100 (MWE) i średnicy otworu $d = 85$ mm

H [m]	L [m]	Z_0 [m]	Z [m]
7	7,96	2,85	2,80
10	11,00	2,97	2,92
12	13,04	3,01	2,97
15	16,08	3,05	3,01
17	18,11	3,07	3,03
20	21,16	3,10	3,05
22	23,19	3,11	3,06

Parametry stałe dla wszystkich powyższych obliczeń: $c = 6,24 \text{ kg mb}^{-1}$, $l_p = 2,38 \text{ m}$, $l_{pw} = 0,85 \text{ m}$, $q = 0,63 \text{ kg m}^{-3}$.

Tab. 3. Zestawienie obliczonych parametrów geometrycznych otworu oraz parametrów strzałowych dla Exan Bulk (ANFO) i średnicy otworu $d = 110$ mm

H [m]	L [m]	Z_0 [m]	Z [m]
7	8,21	3,37	3,32
10	11,25	3,55	3,50
12	13,29	3,62	3,57
15	16,33	3,69	3,64
17	18,36	3,73	3,67
20	21,41	3,76	3,70
22	23,44	3,78	3,72

Parametry stałe dla wszystkich powyższych obliczeń: $c = 7,79 \text{ kg mb}^{-1}$, $l_p = 3,08 \text{ m}$, $l_{pw} = 1,1 \text{ m}$, $q = 0,52 \text{ kg m}^{-3}$.

Tab. 4. Zestawienie obliczonych parametrów geometrycznych otworu oraz parametrów strzałowych dla Centra Gold 100 (MWE) i średnicy otworu $d = 110$ mm

H [m]	L [m]	Z ₀ [m]	Z [m]
7	8,21	3,39	3,34
10	11,25	3,57	3,52
12	13,29	3,64	3,59
15	16,33	3,71	3,66
17	18,36	3,75	3,69
20	21,41	3,78	3,73
22	23,44	3,80	3,74

Parametry stałe dla wszystkich powyższych obliczeń: $c = 10,45 \text{ kg mb}^{-1}$, $l_p = 3,08 \text{ m}$, $l_{pw} = 1,1 \text{ m}$, $q = 0,69 \text{ kg m}^{-3}$. Ilość MW potrzebną do wypełnienia otworu strzałowego obliczono wykorzystując wzór:

$$Q_{otw} = l_{MW} \cdot c \quad (7)$$

gdzie: Q_{otw} – masa MW w jednym otworze [kg], l_{MW} – długość ładunku MW w otworze strzałowym [m], c – ciężar właściwy MW w 1 mb otworu [kg mb^{-1}].

Zestawienie wielkości ładunków w zależności od średnicy otworu, rodzaju MW o oraz wysokości ściany prezentuje tabela 5.

Tab. 5. Wielkość ładunków przypadających na otwór strzałowy

H [m]	Średnica otworu strzałowego/ rodzaj MW			
	d = 85 [mm]		d = 110 [mm]	
	ANFO [kg]	MWE [kg]	ANFO [kg]	MWE [kg]
7	25,94	34,80	39,94	53,58
10	40,10	53,82	63,68	85,42
12	49,55	66,49	79,50	106,64
15	63,71	85,50	103,23	138,48
17	73,15	98,17	119,05	159,70
20	87,32	117,18	142,78	191,53
22	96,76	129,85	158,60	212,76

3. Koszty środków strzałowych w zależności od stosowanego systemu inicjowania

Dla przyjętych założeń koszt środków strzałowych jest składową kosztu MW oraz środków inicjujących niezależnie od systemu inicjowania. Ponieważ ilość stosowanego MW w danych warunkach jest wartością stałą, jako zmienną należy potraktować koszt zapalników w systemie elektrycznym i elektronicznym oraz koszt zapalnika i konektora w systemie nieelektrycznym. W zależności od cen środków inicjujących oraz zmiany parametrów strzałowych i geometrycznych otworu będą zmieniać się proporcje pomiędzy ceną MW a ceną zapalników.

Według metodyki prowadzenia prac strzelniczych metodą długich otworów w każdym z otworów należy założyć 2 ładunki udarowe [4]. Co oznacza w systemie elektrycznym zastosowanie dwóch zapalników elektrycznych, w systemie nieelektrycznym dwóch zapalników nieelektrycznych i jednego konektora, natomiast w systemie elektronicznym dwóch zapalników elektronicznych. Ponieważ zapalniki rozmieszczone są na różnych skrajnych wysokościach w otworze strzałowym w celu redukcji kosztów dobrano zapalniki o zróżnicowanych długościach przewodów wybierając jeden z zapalników z krótkim przewodem (6 m) lub rurką nieelektryczną w przypadku zapalnika nieelektrycznego.

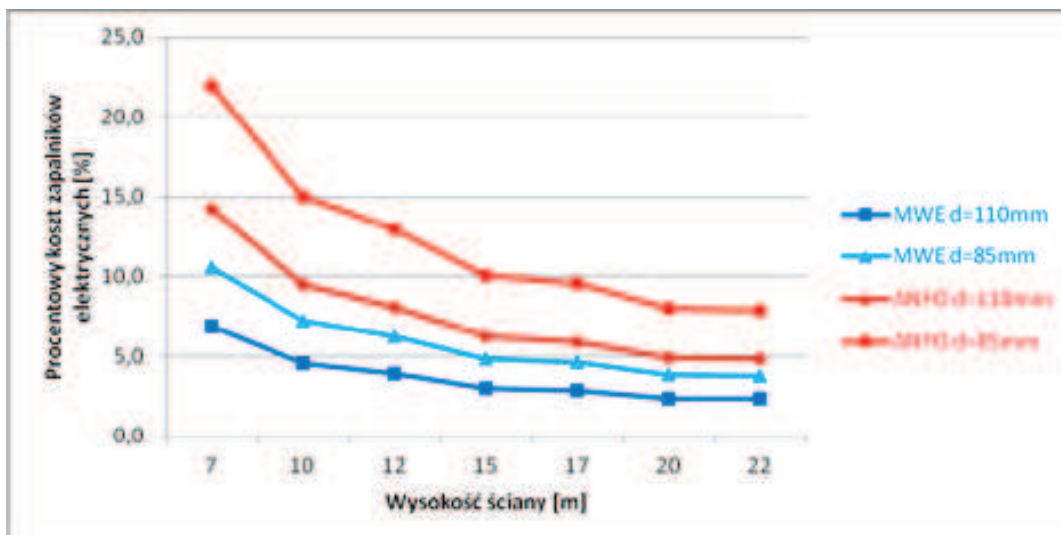
3.1. Koszty środków strzałowych przy stosowaniu elektrycznego systemu inicjowania

W ramach analizy przeprowadzonej dla elektrycznego systemu inicjowania wykonano zestawienie cen zapalników oraz MW a następnie obliczono procentowy udział kosztów zapalników elektrycznych do kosztów

MW. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 6 oraz na rysunku 4.

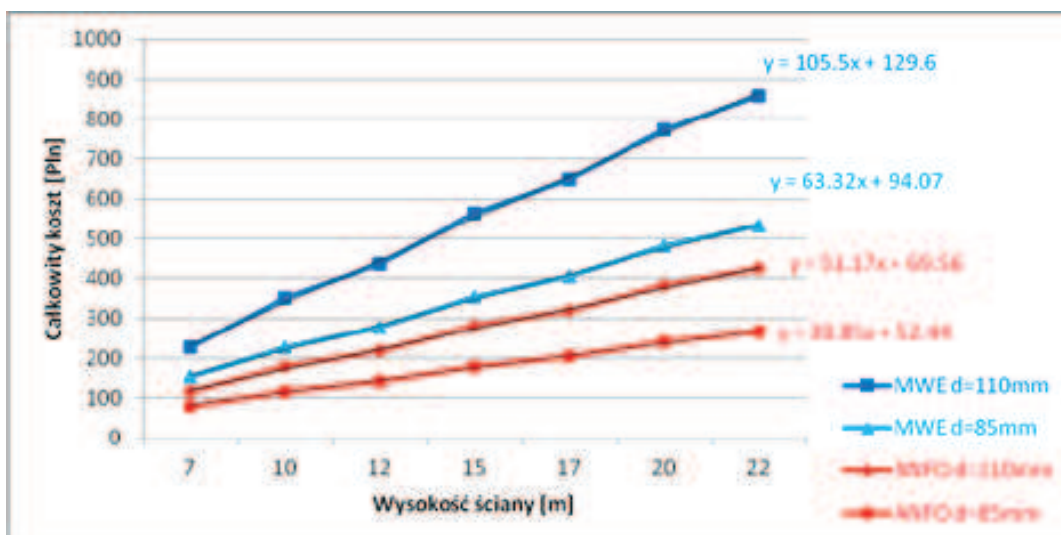
Tab. 6. Koszt środków strzałowych przy wykorzystaniu elektrycznego systemu inicjowania w zależności od rodzaju MW i parametrów geometrycznych otworu

H [m]	Koszty MW [Pln]				Koszty zapalników elektrycznych [Pln]	Procentowy koszt zapalników elektrycznych [%]			
	d = 85 mm		d = 110 mm			d = 85 mm		d = 105 mm	
	ANFO	MWE	ANFO	MWE		ANFO	MWE	ANFO	MWE
7	66,15	137,46	101,85	211,64	14,54	21,98	10,58	14,28	6,87
10	102,26	212,57	162,38	337,41	15,37	15,03	7,23	9,47	4,56
12	126,34	262,63	202,72	421,24	16,35	12,94	6,23	8,07	3,88
15	162,46	337,71	263,23	546,98	16,35	10,06	4,84	6,21	2,99
17	186,55	387,77	303,57	630,81	17,87	9,58	4,61	5,89	2,83
20	222,67	462,85	364,09	756,56	17,87	8,03	3,86	4,91	2,36
22	246,75	512,91	404,43	840,38	19,37	7,85	3,78	4,79	2,30



Rys. 4. Procentowy udział kosztów zapalników elektrycznych dla zadanych wysokości ścian i średnic otworów strzałowych: d = 85 mm i d = 110 mm do MW w otworze

Sumaryczne zestawienie kosztów MW i środków inicjujących przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Całkowite koszty środków strzałowych przy wykorzystaniu elektrycznego systemu inicjowania dla MWE i ANFO dla średnic otworów strzałowych: 85 mm i 110 mm

Z przedstawionych wyników i porównań można wyciągnąć następujące wnioski:

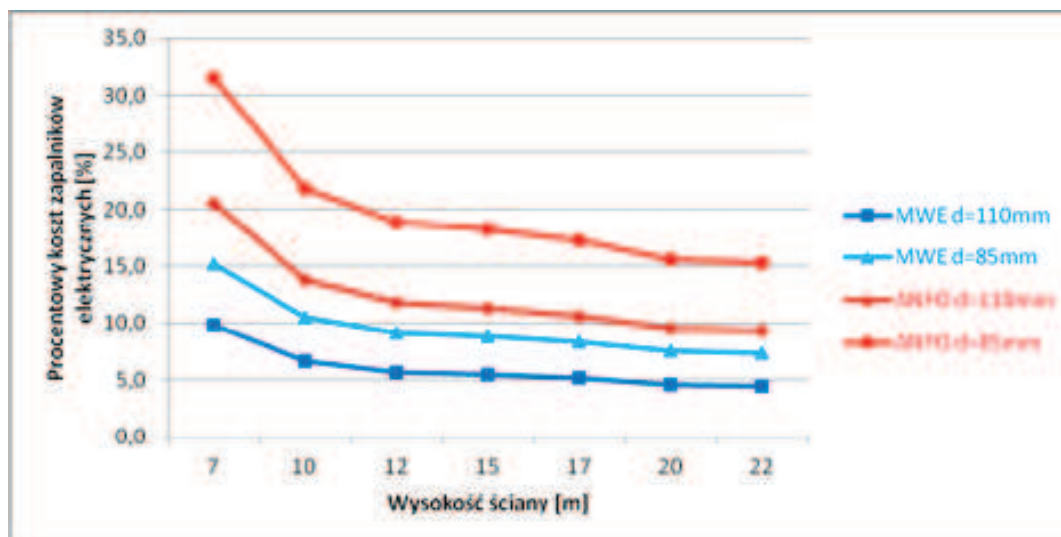
- Procentowy udział kosztów zapalników do kosztów MW w przypadku MW typu ANFO, wysokości ściany 7 m i $d = 85$ mm i wynosi 21,98%. W przypadku MWE dla identycznych parametrów procentowy koszt jest ponad dwukrotnie niższy i wynosi 10,58%. Jest to związane z dużą różnicą cen pomiędzy przyjętym MWE i MW typu ANFO.
- Analogicznie dla wysokości ściany 7 m i średnicy 105 mm procentowy udział kosztów MWE do zapalników i MW typu ANFO do zapalników jest niższy w porównaniu do wartości odpowiadających średnicy 85 mm. Zwiększenie wielkości średnicy powoduje wzrost objętości otworu strzałowego a tym samym jego części wypełnionej MW, dlatego obniża się wartość tego wskaźnika.
- Generalnie niezależnie od średnicy otworu oraz wykorzystanego MW zauważalny jest spadek wartości procentowego udziału kosztów zapalników do kosztów MW w przypadku wzrostu wysokości ścian. Im większa wysokość ściany tym dłuższy otwór strzałowy oraz jego objętość wypełniona MW. Ponieważ niezależnie od wysokości ściany metoda prac strzałowych zakłada wykorzystanie dwóch zapalników procentowy wskaźnik relacji cen zapalników do MW obniża się. W przypadku MWE dla wysokości ściany 22 m i średnicy 105 mm współczynnik ten przyjmuje wartość najniższą - 2,3%
- Ze względu na stałą ilość zapalników całkowite koszty prowadzenia prac strzałowych rosną w sposób liniowy niezależnie od rodzaju MW. Na podstawie równań linii trendu widoczna jest niemal dwukrotnie wyższa dynamika wzrostu kosztów w przypadku MWE w stosunku do MW ANFO wraz ze wzrostem długości otworu. Jest to związane ze znacznie większą ceną materiału emulsyjnego.

3.2. Koszty środków strzałowych przy stosowaniu nieelektrycznego systemu inicjowania

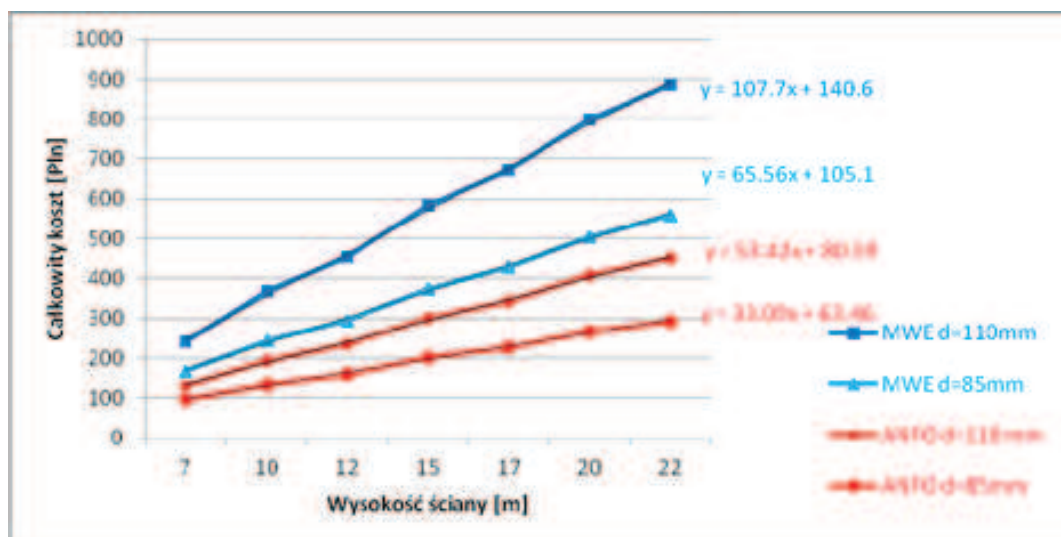
Podobna analiza wykonana została dla stosowania nieelektrycznego systemu inicjowania W przypadku sytemu nieelektrycznego w analizie kosztów uwzględniono także wykorzystanie łącznika powierzchniowego – konektora. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 7 oraz na rysunku 6.

Tab. 7. Koszt środków strzałowych przy wykorzystaniu nieelektrycznego systemu inicjowania w zależności od rodzaju MW i parametrów strzałowych

H [m]	Koszty MW [Pln]				Koszty zapalników nieelektrycznych [Pln]	Procentowy koszt zapalników nieelektrycznych [%]			
	d = 85 mm		d = 110 mm			d = 85 mm		d = 105 mm	
	ANFO	MWE	ANFO	MWE		ANFO	MWE	ANFO	MWE
7	66,15	137,46	101,85	211,64	20,87	31,55	15,18	20,49	9,86
10	102,26	212,57	162,38	337,41	22,34	21,85	10,51	13,76	6,62
12	126,34	262,63	202,72	421,24	23,85	18,88	9,08	11,77	5,66
15	162,46	337,71	263,23	546,98	29,67	18,26	8,79	11,27	5,42
17	186,55	387,77	303,57	630,81	32,25	17,29	8,32	10,62	5,11
20	222,67	462,85	364,09	756,56	34,73	15,60	7,50	9,54	4,59
22	246,75	512,91	404,43	840,38	37,73	15,29	7,36	9,33	4,49



Rys. 6. Procentowy udział kosztów zapalników nieelektrycznych dla zadanych wysokości ścian i średnic otworów strzałowych: $d = 85$ mm i $d = 110$ mm do MW w otworze



Rys. 7. Całkowite koszty środków strzałowych przy wykorzystaniu nieelektrycznego systemu inicjowania dla średnic otworów strzałowych: $d = 85$ mm i $d = 110$ mm

Z przedstawionych wyników i porównań można wyciągnąć następujące wnioski:

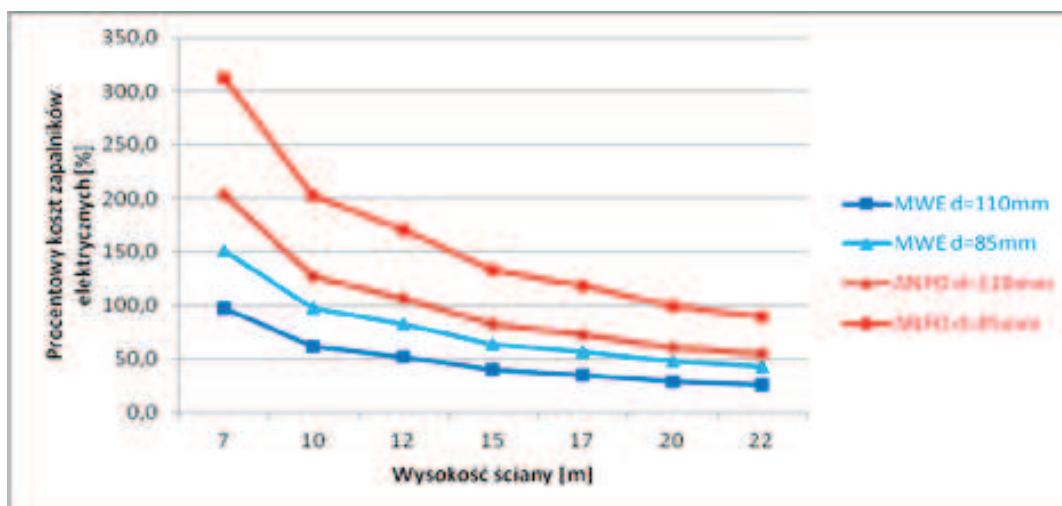
- Podobnie jak w przypadku cen zapalników elektrycznych zapalniki nieelektryczne o większej długości elementu łączącego - rurki nieelektrycznej są droższe, co podnosi koszt środków inicjujących przy zwiększającej się wysokości ścian.
- Procentowa wartość wskaźnika kosztów zapalników do MW dla $H = 7$ m, $d = 85$ mm i MW typu ANFO wynosi 31,55% i jest wyższa niż analogiczna wartość dla systemu elektrycznego. Jest to związane wyższym kosztem środków inicjujących w systemie nieelektrycznym. Podobnie wszystkie wartości wskaźnika dla pozostałych parametrów będą podwyższone w stosunku do wartości uzyskanych dla identycznych założeń w systemie elektrycznym.
- Wartość wskaźnika kosztów zapalników do MW podobnie jak w przypadku systemu elektrycznego zmniejsza się wraz ze wzrostem wysokości ściany od wartości 31,55% (dla $H = 7$ m, $d = 85$ mm i MW typu ANFO) do wartości 4,49% (dla $H = 22$ m, $d = 105$ mm i MWE).
- W przypadku kosztów całkowitych prowadzenia prac strzałowych obserwuje się podobne zależności jak w przypadku systemu elektrycznego.

3.3. Koszty środków strzałowych przy stosowaniu elektronicznego systemu inicjowania

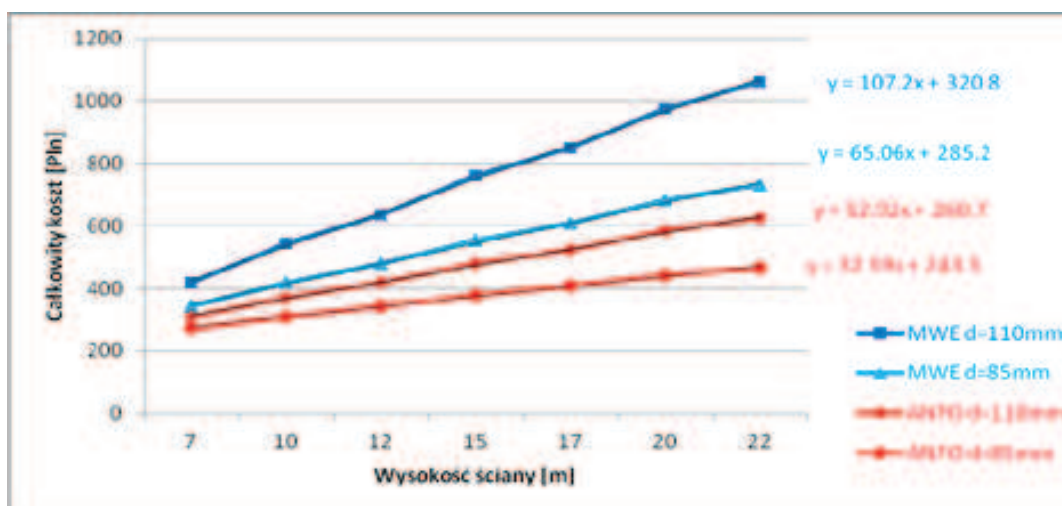
Dla elektronicznego systemu inicjowania wykonano zestawienie cen zapalników elektronicznych oraz MW a następnie obliczono procentowy udział kosztów zapalników do kosztów MW. Wyniki obliczeń zaprezentowano w tabeli 8 oraz na rysunku 8. Całkowity koszt środków strzałowych w systemie elektronicznym obrazuje rysunek 9.

Tab. 8. Koszt środków strzałowych przy wykorzystaniu elektronicznego systemu inicjowania w zależności od rodzaju MW i parametrów strzałowych

H [m]	Koszty MW [Pln]				Koszty zapalników elektronicznych [Pln]	Procentowy koszt zapalników elektronicznych [%]			
	d = 85 mm		d = 110 mm			d = 85 mm		d = 105 mm	
	ANFO	MWE	ANFO	MWE		ANFO	MWE	ANFO	MWE
7	66,15	137,46	101,85	211,64	206,80	312,62	150,44	203,05	97,71
10	102,26	212,57	162,38	337,41		202,23	97,29	127,36	61,29
12	126,34	262,63	202,72	421,24	215,60	170,65	82,09	106,35	51,18
15	162,46	337,71	263,23	546,98		132,71	63,84	81,90	39,42
17	186,55	387,77	303,57	630,81	219,90	117,88	56,71	72,44	34,86
20	222,67	462,85	364,09	756,56		98,76	47,51	60,40	29,07
22	246,75	512,91	404,43	840,38		89,12	42,87	54,37	26,17



Rys. 8. Procentowy udział kosztów zapalników elektronicznych dla zadanych wysokości ścian i średnic otworów strzałowych: d = 85 mm i d = 110 mm do MW w otworze



Rys. 9. Całkowite koszty środków strzałowych przy wykorzystaniu elektronicznego systemu inicjowania dla średnic otworów strzałowych: d = 85 mm i d = 110 mm

Na podstawie wyników wywnioskowano następujące prawidłowości:

- W przypadku zastosowania elektronicznego systemu inicjowania koszt zapalników elektronicznych jest około dziesięciokrotnie wyższy w porównaniu do cen zapalników pochodzących z innych systemów
- Koszt zapalników elektronicznych nie zmienia się w znaczący sposób w zależności od długości jego przewodu jak ma to miejsce w przypadku systemów elektrycznych i nieelektrycznych
- W przypadku systemu elektronicznego koszt zapalników stanowi znaczący koszt całkowity prowadzenia prac strzałowych w przypadku niewielkich wysokości ścian. Dla ANFO przy $H = 7$ m i $d = 85$ mm koszt zapalników wynosi 76% kosztów całkowitych prowadzenia prac strzałowych. Dla wysokości ścian $H = 22$ m i średnicy $d = 105$ mm wartość ta szybko się obniża, zapalniki stanowią już w tym przypadku tylko około 20% kosztów strzelania.
- Dla większych średnic otworów obserwowalny jest spadek wartości wskaźnika kosztów zapalników do MW. Jest to spowodowane wzrostem pojemności otworu co z kolei wpływa na wzrost masy MW
- Ze względu na bardzo wysoką cenę zapalników elektronicznych wskaźnik procentowy kosztów zapalników do MW jest bardzo wysoki przyjmując wartość 312,64% (dla $H = 7$ m, $d = 85$ mm, MW typu ANFO) oraz dużo niższą wartość 150,44% (dla $H = 7$ m, $d = 85$ mm, MWE) co jest spowodowane wyższą ceną materiału emulsyjnego. Najniższą wartość wskaźnik przyjmuje 26,17% (dla $H = 22$ m, $d = 105$ mm, MWE). Najkorzystniejsza wartość wskaźnika kosztów uzyskana w systemie elektronicznym jest porównywalna do wartości otrzymanych w systemach elektrycznym i elektronicznym uzyskanych dla najniższych wysokości ścian oraz średnic otworów.
- W systemie elektronicznym koszty całkowite prowadzenia prac podobnie jak w innych systemach rosną linowo wraz ze wzrostem wysokości ściany. Ze względu na bardzo dużą cenę zapalników koszty te dla podobnych warunków geometrycznych otworu są wyższe niż analogiczne wartości w innych systemach. Dla $H = 22$ m, $d = 110$ mm i MWE koszt środków strzałowych umieszczonym w otworze strzałowym przekracza 1000 zł.

4. Porównanie kosztów jednostkowych prowadzenia prac strzałowych w zależności od systemu inicjowania

Pod pojęciem koszt jednostkowy należy rozumieć koszt wydany na środki strzałowe w przeliczeniu na uzysk 1 m^3 urobku. Wskaźnik ten wyliczany jest na podstawie relacji kosztów całkowitych do objętości uzyskanego urobku. Jest on najlepszym estymatorem opłacalności stosowania danego systemu strzałowego w konkretnych warunkach.

Objętość uzyskanego w wyniku strzelania urobku z jednego otworu strzałowego obliczono ze wzoru:

$$V = a \cdot Z \cdot H \quad (8)$$

gdzie: V – objętość urobku [m^3], a – odległość między otworami strzałowymi [m], Z – zabiór [m], H – wysokość ściany [m].

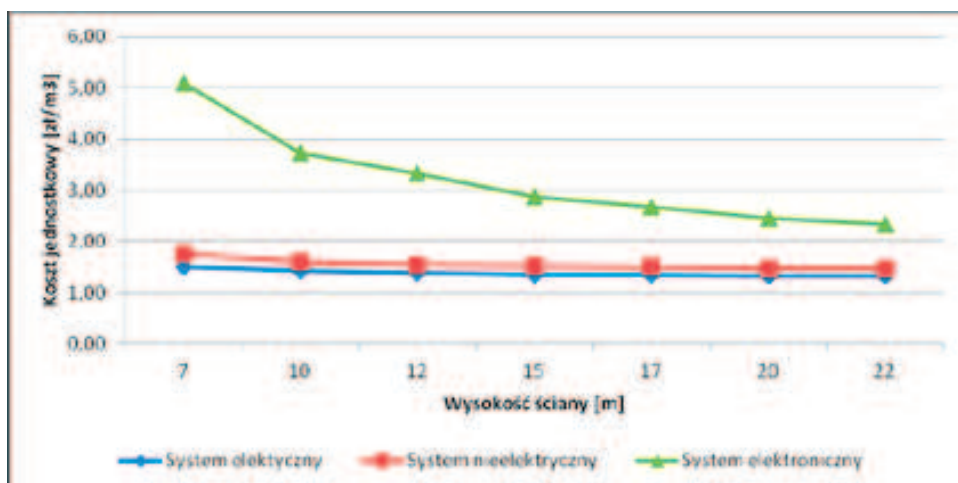
Wskaźnik kosztu jednostkowego K_j obliczono ze wzoru:

$$K_j = \frac{K_{MW}}{V} \quad (9)$$

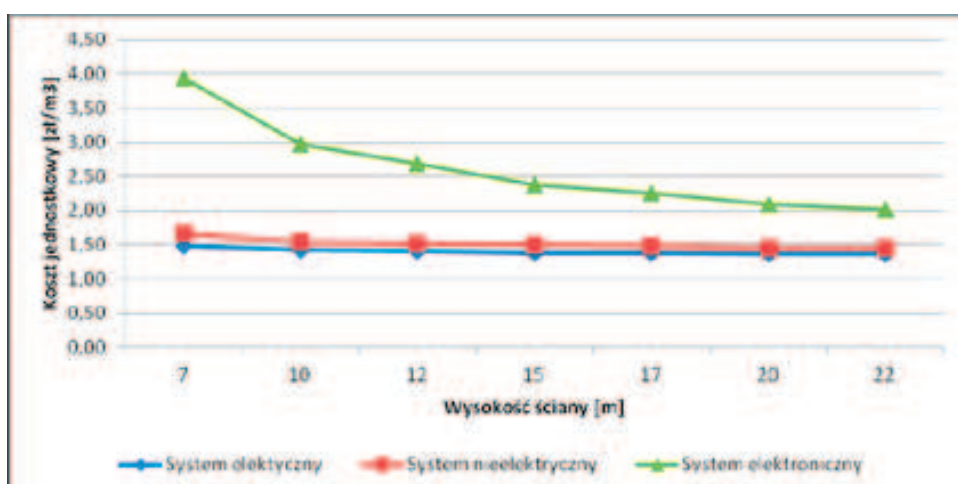
gdzie: K_j – wskaźnik kosztu jednostkowego [pln m^{-3}], K_{MW} – koszt całkowity środków strzałowych [pln], V – objętość urobku uzyskana w wyniku strzelania w otworze strzałowym [m^3].

Zestawienie kosztów jednostkowych dla zadanych parametrów prezentują poniższe rysunki.

Wskaźnik kosztów jednostkowych dla saletrolu Exan Bulk (ANFO)

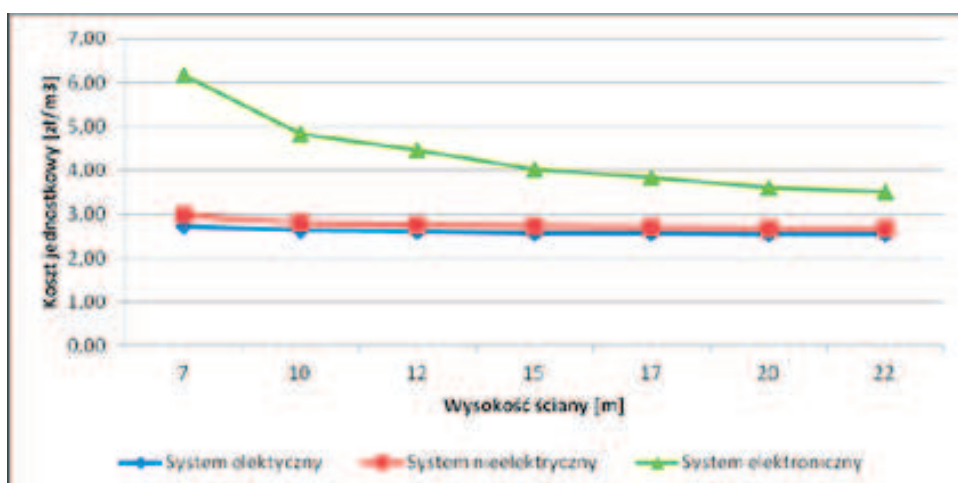


Rys. 10. Koszt jednostkowy uzyskania metra sześciennego urobku dla MW typu ANFO i średnicy otworu strzałowego $d = 85$ mm

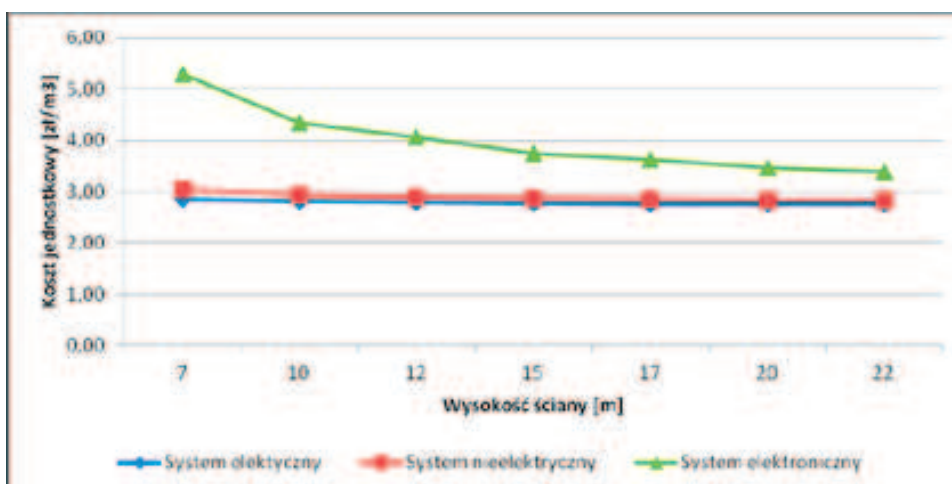


Rys. 11. Koszt jednostkowy uzyskania metra sześciennego urobku dla MW typu ANFO i średnicy otworu strzałowego $d = 110$ mm

Wskaźnik kosztów jednostkowych dla materiału emulsyjnego Centra Gold 100 (MWE)



Rys. 12. Koszt jednostkowy uzyskania metra sześciennego urobku dla MWE i średnicy otworu strzałowego $d = 85$ mm



Rys. 13. Koszt jednostkowy uzyskania metra sześciennego urobku dla MWE i średnicy otworu strzałowego $d = 110$ mm

5. Wnioski i spostrzeżenia

Koszt jednostkowy K_j niezależnie od średnicy otworu i stosowanego MW maleje, gdy wzrasta wysokość ściany. W przypadku systemu elektrycznego i nieelektrycznego jest to spadek liniowy, natomiast w przypadku systemu elektronicznego spadek ma charakter logarytmiczny.

Koszt jednostkowy urabiania skał jest generalnie niższy w przypadku MW typu ANFO w porównaniu do MWE. Jest to spowodowane niższą ceną saletrolu.

W przypadku większej średnicy otworu wartości kosztu jednostkowego zmniejszają się w systemie elektronicznym. Natomiast w przypadku pozostałych systemów koszty te pozostają na podobnym poziomie.

Duży koszt jednostkowy w systemie elektronicznym powodowany jest wysoką ceną zapalników elektronicznych. W systemie elektronicznym dla niskich wysokości ścian $H = 7$ m wartość wskaźnika kosztu jednostkowego jest blisko dwukrotnie wyższa (niezależnie od średnicy otworu) w porównaniu do wartości uzyskanych dla pozostałych systemów przy tej samej wysokości ściany. Wraz ze wzrostem długości otworu koszty jednostkowe przyjmują zbliżone wartości. Jest to szczególnie dobrze widoczne w przypadku ściany $H = 22$ m, co stanowi dowód, że stosowanie elektronicznych systemów inicjowania może być opłacalne w stosunku do konkurencyjnych narzędzi inicjacji dla długich otworów, gdy prace strzałowe prowadzi się w warunkach bardzo wysokich ścian oraz dużym wydobyciu.

6. Podsumowanie

Ponieważ przeprowadzone symulacje i obliczenia mają jedynie charakter poglądowy oraz brakuje im odniesienia do konkretnego przypadku odkrywkowego zakładu górniczego, trudno jednoznacznie zaproponować wybór optymalnego systemu prowadzenia prac strzałowych. Uwzględniając jedynie kryterium kosztów MW oraz wskaźnika procentowego kosztów środków inicjujących do MW a także kierując się zasadą minimalizacji kosztów prowadzenia prac strzałowych niewątpliwie najmniej kosztowne jest stosowanie elektrycznego systemu inicjowania. Nieco wyższy koszt sumaryczny uzyskano dla systemu nieelektrycznego, natomiast największe koszty prowadzenia prac strzałowych uzyskuje się w przypadku systemu elektronicznego, co jest spowodowane wysoką ceną zapalników elektronicznych niekiedy dziesięciokrotnie wyższą od cen zapalników w konkurencyjnych systemach.

Biorąc pod uwagę uwarunkowania techniczne niewątpliwie najbardziej zaawansowanym narzędziem prowadzenia prac strzałowych jest elektroniczny system inicjowania, umożliwiający komputerowe projektowanie i kontrolę sieci a także zdalne odpalanie ładunków. Możliwość zadawania niemal dowolnych czasów opóźnień zapewnia wysoką dokładność działania, a wprowadzenie programatora i zapalarki stanowi zabezpieczenie przed przypadkowym zainicjowaniem reakcji wybuchowej [4].

Przy doborze systemu inicjowania dla konkretnych warunków prowadzenia prac strzałowych należy kierować się także innymi kryteriami, przede wszystkim względami bezpieczeństwa, niezawodnością i dokładnością działania, możliwością kontroli sieci, oraz pozostałymi wadami i zaletami systemów strzałowych. Dlatego dobór odpowiedniego systemu powinien być poprzedzony wnikliwą analizą wyżej wymienionych czynników oraz oceną warunków geologiczno-górnich danej kopalni.

Poszukiwanie rozwiązań optymalnych często sprowadza się stosowania rozwiązań pośrednich będących kompromisem pomiędzy wszystkimi czynnikami negatywnymi i pozytywnymi danego systemu, co doskonale potwierdza powód dla którego nieelektryczny system inicjowania jest obecnie najczęściej stosowany w odkrywkowych zakładach górniczych.

Prawdopodobnie w najbliższej przyszłości należy oczekiwać spadku cen zapalników systemu elektronicznego, który w dalszym ciągu jest stosunkowo nowym narzędziem prowadzenia prac strzałowych w Polsce, co spowoduje wzrost opłacalności tego systemu oraz sukcesywne wypieranie systemów elektrycznych i nieelektrycznych z rynku.

Literatura

- [1] Korzeniowski J. Onderka Z. *Roboty strzelnicze w górnictwie odkrywkowym*, Wydawnictwa i Szkolenia Górnicze Burnat&Korzeniowski, 2006.
- [2] Maranda A. Gołąbek B. Kasperski J. *Materiały wybuchowe emulsyjne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
- [3] Morawa R., Onderka Z. – materiały niepublikowane.
- [4] Moraw R., Janik M., *Wymierne korzyści z zastosowania zapalników elektronicznych* Bezpieczeństwo Robót Strzałowych, GIG 2010.
- [5] Rozporządzenia Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 1 kwietnia 2003 r., w sprawie nabywania, przechowywania i używania środków strzałowych w zakładach górniczych. (Dz. U. Nr 72, poz. 655).
- [6] <http://www.oricaminingservices.com/pl/pl> - materiały firmy ORICA Poland Sp. z o. o.