

Analiza numeryczna silosu cylindrycznego opróżnianego niecentrycznie

Promotor – dr hab inż. Jolanta Anna Prusiel, mgr inż. Krzysztof Gierej,
Politechnika Białostocka

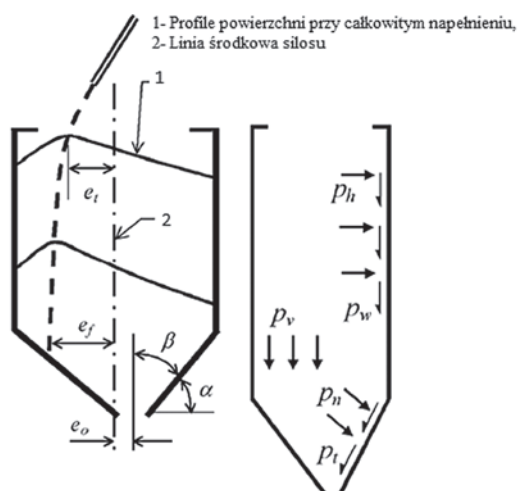
Wprowadzenie

Celem pracy dyplomowej było wyjaśnienie wpływu wielkości mimośrodów otworu wysypowego e_o i promienia kanału przepływu r_c na redystrybucję naprężeń w ścianie cylindrycznego silosu na zboże przy niecentrycznym opróżnianiu komory. W pracy opracowano warianty testów obliczeniowych cylindrycznego silosu wolno stojącego na pszenicę o wysokości $H = 25$ m dla trzech wartości mimośrodu podczas opróżniania ($e_o = 0,25 d_c$, $e_o = 0,375 d_c$, $e_o = 0,5 d_c$) oraz trzech średnic komory silosu ($d_c = 6$ m, $d_c = 8$ m, $d_c = 10$ m). Przeprowadzono analizę obciążeń od parcia ośrodka sypkiego w komorze silosu przy niecentrycznym opróżnianiu na małych i dużych mimośrodkach według PN-EN 1991-4:2008 [N3]. Wykonano wielowariantową analizę numeryczną (MES) silosów jednokomorowych oraz analizę porównawczą sił wewnętrznych w ścianie komory silosu. Na zakończenie podsumowano wyniki analizy numerycznej i sformułowano wnioski.

1. Przegląd literatury z zakresu wyznaczania parcia ośrodka sypkiego w silosach

1.1. Założenia ogólne

Projektując silosy należy obliczać parcia w trzech fazach eksploatacji: w trakcie napełniania, składowania



Rys. 1.1. Rodzaje parcia w silosie oraz mimośrodky (objaśnienia w tekście) [N3]

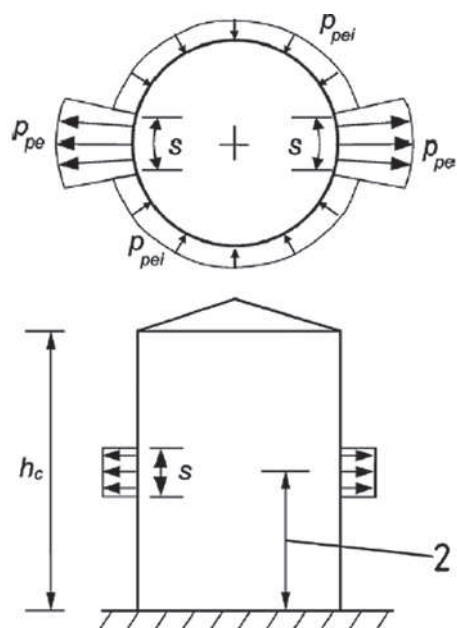
oraz podczas opróżniania [1, 2]. Oddziaływanie ośrodka sypkiego na ściany komory silosu, dzielimy na parcie pionowe p_v , poziome p_h oraz tarcie styczne p_w . Dodatkowo wyróżniamy parcie styczne p_t i normalne p_n działające na ścianę lejka (rys. 1.1). Określając wartości parcia oprócz geometrii silosu i właściwości składowanego materiału należy również uwzględnić wpływ mimośrodu podczas napełniania e_f (usytuowanie otworu nasypowego) oraz mimośród w trakcie opróżniania e_o [N3, 14].

Eurokod 1, cz. 4 [N3] wprowadził podział silosów na trzy klasy oceny oddziaływań (tab. 1.1), które uwzględniają stopień niepewności w stosunku do dokładnego określenia wartości obciążeń. Przypisanie silosowi odpowiedniej klasy wiąże się z zastosowaniem odpowiednich założeń i uproszczeń podczas wyznaczania wartości parcia od materiału sypkiego.

Podczas opróżniania silosów możliwe są dwa podstawowe rodzaje przepływu ośrodka sypkiego: masowy i rdzeniowy. Masowy występuje wtedy, gdy wszystkie cząsteczki podczas opróżniania wprawiane są w ruch. Przepływ rdzeniowy dzieli się na kanałowy (równoległy, kanał zbieżny, równoległy niecentryczny, niecentryczny z kanałem zbieżnym) oraz mieszany (koncentryczny, w pełni niecentryczny, częściowo niecentryczny).

Tabela 1.1. Klasyfikacja oceny oddziaływań na silosy [N3]

Klasa oceny oddziaływań	Charakterystyka klasy
Klasa oceny oddziaływań 3 (AAC3)	Silosy o objętości składowania ponad 10 000 ton. Silosy o objętości składowania ponad 1 000 ton, w których występuje którakolwiek z następujących sytuacji obliczeniowych: niecentryczne opróżnianie przy $e_o/d_c > 0,25$, niskie silosy, przy mimośrodku górnego stożka nasypu $e_f/d_c > 0,25$.
Klasa oceny oddziaływań 2 (AAC2)	Wszystkie silosy omówione w normie PN-EN 1991-4:2008 [N3] i nie umieszczone w innej klasie.
Klasa oceny oddziaływań 1 (AAC1)	Silosy o objętości składowania poniżej 100 ton.



Rys. 1.2. Widok rzutu obciążenia lokalnego przy opróżnianiu [N3]

Rodzaj przepływu określa się, uwzględniając kąt półkowy u wierzchołka lejki β (rys. 1.1) oraz współczynnik tarcia o ścianę lejki μ_h . W pracy magisterskiej przyjęto lej stożkowy o kącie $\beta = 23^\circ$ oraz współczynnik tarcia $\mu_{hd} = 0,491$. Na podstawie PN-EN 1991-4:2008 (rys. 4.1a) [N3] w analizowanych silosach stwierdzono przepływ rdzeniowy.

1.2. Obliczanie parcia materiału sypkiego podczas opróżniania

W pracy dyplomowej omówiono zasady wyznaczania wartości parć podczas opróżniania silosów smukłych, średnio smukłych oraz niskich. Poniżej przedstawiono procedury wyznaczania składowych parcia w silosach smukłych.

Parcie poziome i styczne (tarcie powierzchniowe) działające na ściany silosu podczas opróżniania komory zgodnie

z PN-EN 1991-4 [N3] wyznacza się ze wzorów:

$$p_{he} = C_h \cdot p_{hf} \tag{1.1}$$

$$p_{we} = C_w \cdot p_{wf} \tag{1.2}$$

gdzie: C_h i C_w – odpowiednio współczynnik zwiększający symetryczne parcie poziome i styczne (tarcie powierzchniowe) podczas opróżniania, p_{hf} i p_{wf} – odpowiednio parcie poziome i tarcie powierzchniowe o ścianę po napełnieniu silosu, wyznaczone wg teorii Janssena [N3]. Podczas niecentrycznego opróżniania silosu zwiększone parcie lokalne (obciążenie miejscowe) skierowane na zewnątrz silosu (rys. 1.2) wyznacza się ze wzoru [N3]:

$$p_{pe} = C_{pe} \cdot p_{he} \tag{1.3}$$

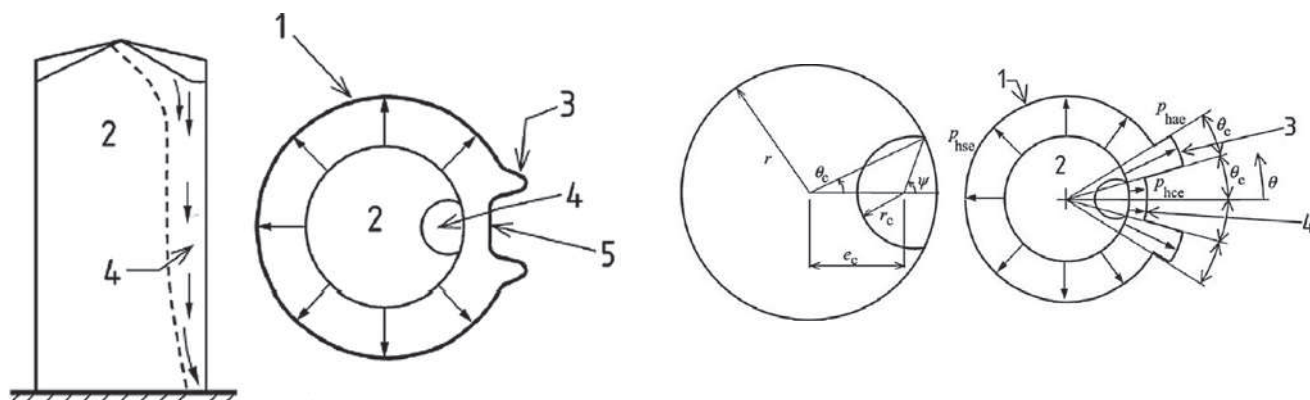
gdzie: C_{pe} – współczynnik zwiększający przy obliczaniu parcia lokalnego podczas opróżniania, który zależy od wielkości mimośrodowo opróżniania i napełniania, geometrii komory i właściwości ośrodka sypkiego, p_{he} – parcie poziome na ścianę silosu podczas opróżniania. Składową parcia lokalnego skierowaną do wewnątrz komory silosu i działającą na pozostałej części obwodu silosu (rys. 1.2) oblicza się ze wzoru:

$$p_{pei} = \frac{p_{pe}}{7} \tag{1.4}$$

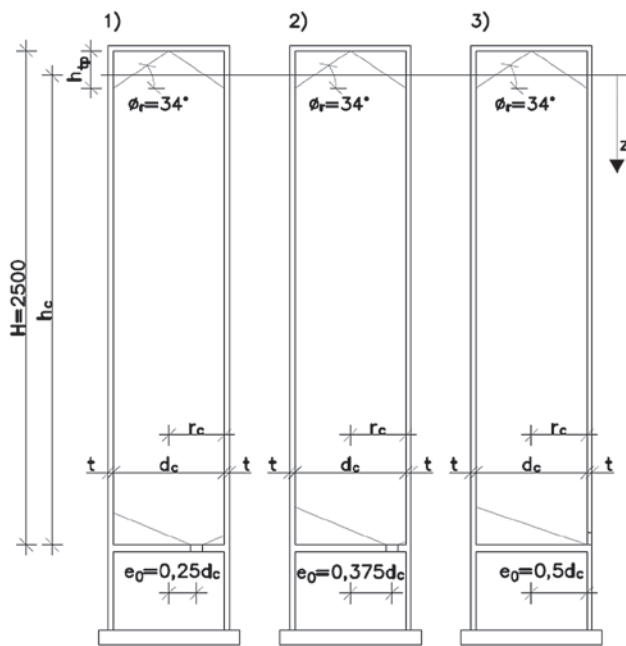
Zgodnie z PN-EN 1991-4 [N3] w silosach zaliczanych do klasy AAC2 i opróżnianych na dużym mimośrodku ($e_0 > 0,25 d_c$) zakłada się, że geometria kanału przepływu (rys. 1.3) jest określona przez stały kąt $\theta_c = 35^\circ$. Natomiast składowe parcia w przekroju poziomym silosu nie zależą od wielkości mimośrodowo opróżniania i przyjmują wartości:

$$p_{hce} = 0, \quad p_{hae} = 2p_{hf}, \quad p_{hse} = p_{hf} \tag{1.5}$$

gdzie: p_{hce} – parcie poziome w strefie przepływu, p_{hae} – parcie poziome krawędziowe, p_{hse} – parcie poziome w strefie



Rys. 1.3. Niecentryczny kanał przepływu przy opróżnianiu silosu i rozkład parcia [N3]: 1 – parcie statyczne (p_{hse}), 2 – strefa ośrodka w bezruchu, 3 – lokalne maksimum parcia (p_{hae}), 4 – kanał przepływu, 5 – parcie w kanale przepływu (p_{hce})



Rys. 2.1. Geometria komór silosów z trzema wariantami mimośrodów otworu wysypowego: 1) $e_0 = 0,25d_c$, 2) $e_0 = 0,375d_c$, 3) $e_0 = 0,5d_c$

bezruchu, p_{hf} – parcie poziome po napełnieniu silosu. Wartości parcia stycznego (tarcie o ścianę silosu) oblicza się na podstawie wzorów:

$$p_{wce} = 0, p_{wae} = 2p_{wfp}, p_{wse} = p_{wfc} \quad (1.6)$$

gdzie: p_{wce} – parcie styczne w strefie przepływu, p_{wae} – parcie styczne na krawędzi kanału przepływu, p_{wse} – parcie styczne w strefie bezruchu, p_{wfp} – parcie styczne (tarcie powierzchniowe) po napełnieniu silosu.

W przypadku silosów zaliczanych do klasy ACC3, aby uwzględnić losowo zmienną w czasie geometrię kanału przepływu, należy przeprowadzić obliczenia parcia dla trzech różnych promieni kanału przepływu [N3]:

$$r_c = 0,25r; \quad r_c = 0,4r; \quad r_c = 0,6r \quad (1.7)$$

gdzie r jest promieniem silosu cylindrycznego. Parcia na ścianę silosów klasy ACC3 (rys. 1.3) oblicza się na podstawie wzorów:

$$p_{hce} = p_{hco} (1 - e^{-z/z_{oc}}) = \gamma K z_{oc} (1 - e^{-z/z_{oc}}), p_{wce} = \mu p_{hce}, \quad (1.8)$$

$$p_{hse} = p_{hfp}, p_{wse} = p_{wfp}, \quad (1.9)$$

$$p_{hae} = 2p_{hfp} - p_{hce}, p_{wae} = \mu p_{hae}, \quad (1.10)$$

gdzie: z – głębokość mierzona od powierzchni zastępczej materiału, z_{oc} – głębokość charakterystyczna we wzorze Janssena w kanale przepływu przy niecentrycznym opróżnianiu, K – wartość ilorazu parcia bocznego, μ – współczynnik tarcia materiału sypkiego o ścianę.

Tabela 2.1. Zestawienie danych geometrii komory silosu przyjętych do analizy numerycznej

Dane geometrii komory silosu	Średnica $d_c = 6$ m	Średnica $d_c = 8$ m	Średnica $d_c = 10$ m
Wysokość ściany	$H = 25$ m	$H = 25$ m	$H = 25$ m
Grubość ściany	$t = 0,25$ m	$t = 0,25$ m	$t = 0,25$ m
Wewnętrzny promień	$r_w = 3,0$ m	$r_w = 4,0$ m	$r_w = 5,0$ m
Mimośród osi otworu wysypowego 1) $e_0 = 0,25d_c$	$e_0 = 1,5$ m	$e_0 = 2,0$ m	$e_0 = 2,5$ m
Mimośród osi otworu wysypowego 2) $e_0 = 0,375d_c$	$e_0 = 2,25$ m	$e_0 = 3,0$ m	$e_0 = 3,75$ m
Mimośród osi otworu wysypowego 3) $e_0 = 0,5d_c$	$e_0 = 3,0$ m	$e_0 = 4,0$ m	$e_0 = 5,0$ m
Mimośród osi otworu nasypowego	$e_i = 0,0$ m	$e_i = 0,0$ m	$e_i = 0,0$ m
Kąt nachylenia warstwy nadbetonu	$\varphi_n = 10^\circ$	$\varphi_n = 10^\circ$	$\varphi_n = 10^\circ$
Wysokość górnego stożka nasypowego	$h_{hp} = 2,02$ m	$h_{hp} = 2,7$ m	$h_{hp} = 3,37$ m
Wysokość pionowego segmentu ściany silosu	$h_c = 23,65$ m	$h_c = 23,2$ m	$h_c = 22,75$ m
Pole przekroju poprzecznego silosu	$A = 28,27$ m ²	$A = 50,27$ m ²	$A = 78,54$ m ²
Wewnętrzny obwód pola przekroju poprzecznego silosu	$U = 18,85$ m	$U = 25,13$ m	$U = 31,42$ m
Smukłość silosu	$h/d_c = 3,9 > 2,0$ silos smukły	$h/d_c = 2,9 > 2,0$ silos smukły	$h/d_c = 2,28 > 2,0$ silos smukły

2. Warianty testów numerycznych cylindrycznego silosu wolno stojącego

2.1. Geometria silosu i właściwości ośrodka sypkiego

W celu przeprowadzenia wielowariantowej analizy numerycznej cylindrycznego silosu przyjęto trzy wielkości mimośrodów podczas opróżniania oraz trzy różne średnice komory silosu. Napełnianie silosów przyjęto jako centryczne, a opróżnianie mimośrodowe. Leje silosów uformowano za pomocą warstwy nadbetonu na płycie dennej zamocowanej w ścianie. Na rysunku 2.1 pokazano geometrie silosów, a w tabelach 2.1 oraz 2.2 zestawiono dane dotyczące przyjętych wariantów do analizy statycznej.

Właściwości ośrodków rozdrobnionych można ustalić na podstawie badań laboratoryjnych (Załącznik C PN-EN 1991-4 [N3]) lub według podejścia uproszczonego (p. 4.2.3

Tabela 2.2. Ustalenie klasy oceny oddziaływań w analizowanych silosach

Dane	Średnica	$d_c = 6\text{ m}$			$d_c = 8\text{ m}$			$d_c = 10\text{ m}$		
	Mimośród e_0	$0,25d_c$	$0,375d_c$	$0,5d_c$	$0,25d_c$	$0,375d_c$	$0,5d_c$	$0,25d_c$	$0,375d_c$	$0,5d_c$
Pojemność składowania [tona]		488,4	481,3	471,5	843,7	827,1	803,8	1279,5	1247,0	1201,6
Klasa oceny oddziaływań		AAC2	AAC2	AAC2	AAC2	AAC2	AAC2	AAC2	AAC3	AAC3

Tabela 2.3. Właściwości pszenicy przyjęte do wyznaczenia parcia ośrodka sypkiego w silosie wg PN EN 1991-4 [N3]

Właściwości ośrodka sypkiego	Pszenica			
	Średnia wartość	Parametr a	Górna wartość	Dolna wartość
Ciężar jednostkowy γ [kN/m ³]	-	-	9,0	7,5
Kąt tarcia wewnętrznego ϕ_i [°]	30	1,12	33,6	26,8
Współczynnik tarcia o betonową ścianę μ (ściana typu D3)	0,57	1,16	0,661	0,491
Iloraz parcia bocznego K	0,54	1,11	0,599	0,486
Kąt stoku naturalnego ϕ_r [°]	34			
Bazowy współczynnik parcia lokalnego C_{op}	0,5			

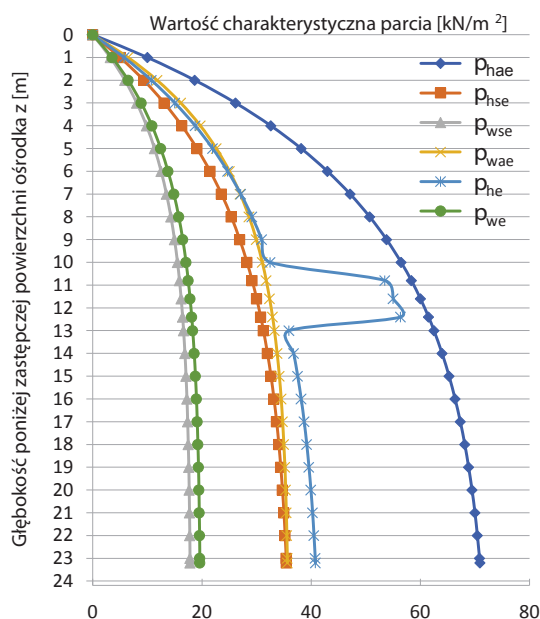
Tabela 2.4. Zestawienie składowych parcia ośrodka sypkiego podczas niecentrycznego opróżniania (wyjaśnienie oznaczeń w rozdziale 1)

Średnica	$d_c = 6\text{ m}$			$d_c = 8\text{ m}$			$d_c = 10\text{ m}$		
Mimośród e_0	$0,25d_c$	$0,375d_c$	$0,5d_c$	$0,25d_c$	$0,375d_c$	$0,5d_c$	$0,25d_c$	$0,375d_c$	$0,5d_c$
Rodzaje parcia	P_{we}	P_{we}	P_{we}	P_{we}	P_{we}	P_{we}	P_{we}	P_{we}	P_{we}
	P_{he}	P_{he}	P_{he}	P_{he}	P_{he}	P_{he}	P_{he}	P_{he}	P_{he}
	P_{pe}	P_{pe}	P_{pe}	P_{pe}	P_{pe}	P_{pe}	P_{pe}	P_{pe}	P_{pe}
	P_{pei}	P_{pei}	P_{pei}	P_{pei}	P_{pei}	P_{pei}	P_{pei}	P_{pei}	P_{pei}
	$P_{hce} = 0$	$P_{hce} = 0$	$P_{hce} = 0$	$P_{hce} = 0$	$P_{hce} = 0$	$P_{hce} = 0$	$P_{hce} = 0$	$P_{hce} = 0$	$P_{hce} = 0$
	$P_{wce} = 0$	$P_{wce} = 0$	$P_{wce} = 0$	$P_{wce} = 0$	$P_{wce} = 0$	$P_{wce} = 0$	$P_{wce} = 0$	$P_{wce} = 0$	$P_{wce} = 0$
	P_{hse}	P_{hse}	P_{hse}	P_{hse}	P_{hse}	P_{hse}	P_{hse}	P_{hse}	P_{hse}
	P_{wse}	P_{wse}	P_{wse}	P_{wse}	P_{wse}	P_{wse}	P_{wse}	P_{wse}	P_{wse}
	P_{hae}	P_{hae}	P_{hae}	P_{hae}	P_{hae}	P_{hae}	P_{hae}	P_{hae}	P_{hae}
	P_{wae}	P_{wae}	P_{wae}	P_{wae}	P_{wae}	P_{wae}	P_{wae}	P_{wae}	P_{wae}

PN-EN 1991-4 [N3]). W pracy dyplomowej przyjęto podejście uproszczone. W tabeli 2.3 wyznaczono górne i dolne wartości parametrów pszenicy, które posłużyły do obliczenia maksymalnych obciążeń od parcia ośrodka sypkiego w komorze silosu.

2.2. Zestawienie kombinacji parcia ośrodka sypkiego podczas opróżniania

W silosach opróżnianych niecentrycznie kombinacja obciążenia w silosie od parcia ośrodka sypkiego zależy od wielkości mimośrodu opróżniania e_0 . Zgodnie z normą [N3] w przypadku opróżniania na małych mimośrodkach ($e_0 = 0,25d_c = e_{0,cr}$ jest wartością graniczną małego mimośrodu) obciążenia na pionową ścianę silosu należy wyznaczać jako symetryczne i dodatkowo uwzględnić parcie lokalne (rys. 1.2). Natomiast w sytuacji wystąpienia dużego mimośrodu, obciążenie w silosie należy ustalać jako parcie rozłożone niesymetrycznie (rys. 1.3). W tabeli 2.4 przedstawiono składowe parcia ośrodka sypkiego na ścianę silosu podczas opróżniania dla przypadku małego i dużego mimośrodu przyjęte do analizy numerycznej.



Rys. 3.1. Wykresy parcia ośrodka sypkiego na ścianę silosu o średnicy $d_c = 8\text{ m}$ podczas opróżniania silosu na mimośrodku $e_0 = 0,5d_c$ (klasa AAC2)

3. Analiza obciążeń od parcia w komorze silosu podczas opróżniania

Wykonano obliczenia składowych parcia pszenicy dla silosów o średnicach 6 m, 8 m, 10 m, kolejno przy trzech różnych mimośrodkach osi otworu wysypowego: $e_0 = 0,25d_c$, $e_0 = 0,375d_c$, $e_0 = 0,5d_c$. Wartości składowych parcia w komorze silosu wyznaczono na podstawie wzorów zamieszczonych w PN-EN 1991-4 [N3] i rozdziale 1 pracy dyplomowej. Na rysunku 3.1 pokazano wykresy składowych parcia podczas opróżniania na dużym mimośrodku dla jednego z analizowanych silosów.

W pracy przeprowadzono analizę geometrii kanału przepływu w silosach zaliczanych do klasy oddziaływań AAC3 przy niecentrycznym opróżnianiu, na podstawie której obliczono kąt θ_c określający strefę przepływu dla ośrodków sypkich (rys. 1.3).

Iloraz mimośrodu kanału przepływu i promienia silosu, który zależy od właściwości ośrodka sypkiego oraz rozpatrywanego przypadku promienia kanału przepływu, po odpowiednich przekształceniach można zapisać w postaci:

$$e_c = r \left[\frac{\mu}{\tan \phi_i} (1 - G - \sqrt{1 - G}) + \sqrt{1 - G} \right] \quad (3.1)$$

Wartość kąta θ_c w strefie kanału przepływu obliczono ze wzoru:

$$\cos \theta_c = \frac{r^2 + (rx)^2 - (Gr)^2}{2 rrx} = \frac{r^2(1 + x^2 + G^2)}{2 r^2 x} = \frac{1 + \left(\frac{e_c}{r}\right)^2 + G^2}{2 \frac{e_c}{r}} \quad (3.2)$$

gdzie: r – promień silosu, G – współczynnik przy określaniu promienia kanału przepływu (odpowiednio wynosi 0,25, 0,4, 0,6), μ – współczynnik tarcia (dolna wartość), ϕ_i – kąt tarcia wewnętrznego przyjętego ośrodka rozdrobnionego (górną wartość), $x = e_c / r$.

Na podstawie powyższych zależności z uwzględnieniem właściwości ośrodków sypkich odczytanych z tab. E1, Zał. E w Eurokodzie 1-4 [N3], wyznaczono parametry opisujące kanał przepływu, tj. iloraz mimośrodu kanału przepływu i promienia komory silosu oraz kąt θ_c dla wybranych materiałów sypkich składowanych w cylindrycznych silosach (tabela 3.1).

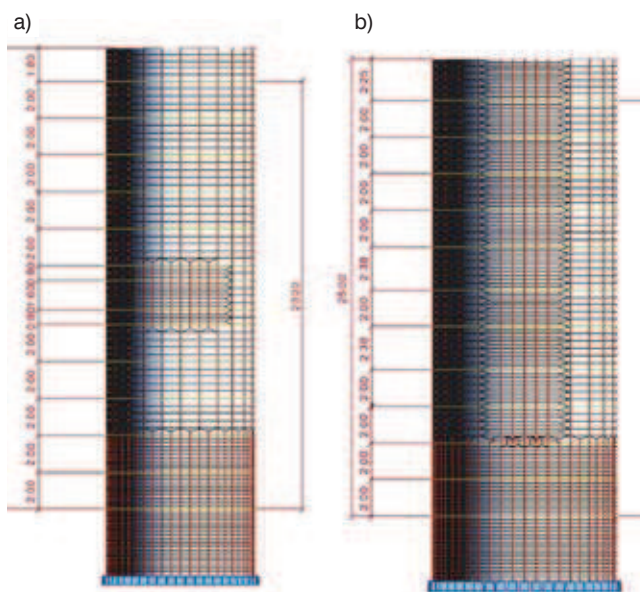
Tabela 3.1. Iloraz mimośrodu kanału przepływu i promienia komory silosu (klasa AAC3) oraz kąt θ_c dla wybranych ośrodków sypkich

Rodzaj ośrodka sypkiego	μ_m	α_μ	μ_d	ϕ_{im}	α_ϕ	ϕ_{ig}	$\mu_d / \tan \phi_{ig}$	e_c / r			kąt θ_c [°]		
								$G = 0,25$	$G = 0,4$	$G = 0,6$	$G = 0,25$	$G = 0,4$	$G = 0,6$
Klinkier cementowy	0,62	1,07	0,58	40	1,2	48	0,522	0,805	0,683	0,511	9,9	17,1	28,1
Popiół lotny	0,82	1,07	0,770	35	1,16	40,60	0,898	0,762	0,618	0,424	5,1	8,5	14,8
Pszenica	0,57	1,16	0,490	30	1,12	33,60	0,738	0,780	0,646	0,461	7,7	13,3	22,3

4. Analiza numeryczna cylindrycznych silosów jednokomorowych

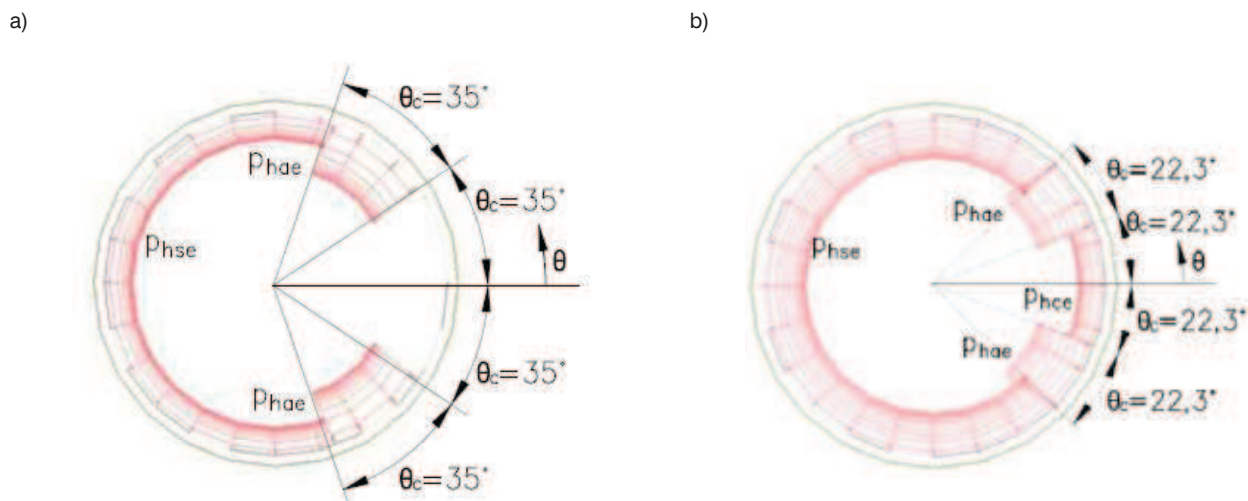
4.1. Dyskretyzacja konstrukcji silosu

W celu wyznaczenia sił wewnętrznych w ścianie komory silosu utworzono w programie Robot Structural Analysis [P1] (moduł projektowanie powłoki) model 3D składający się z płyty przekrycia połączonej przegubowo ze ścianą komory silosu, płyty dennej i ściany komory silosu zamocowanej w sposób sztywny na obwodzie (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Siatka dyskretyzacji modelu silosu o średnicy [P1]: a) $d_c = 8$ m, b) $d_c = 10$ m

W programie [P1] wygenerowano siatkę o wymiarze oczek $0,40 \times 0,78$ m dla silosu o średnicy $d_c = 6$ m, $0,40 \times 1,04$ m dla silosu o średnicy $d_c = 8$ m, $0,40 \times 1,31$ m dla silosu o średnicy $d_c = 10$ m. Zagęszczono ją dwukrotnie w obszarze działania parcia lokalnego, w strefie połączenia ściany z fundamentem oraz płytą dna silosu. Siatkę dla przypadku dużego mimośrodu, w którym rozpatruje się wystąpienie kanału przepływu zagęszczono dwukrotnie w obszarze występowania parcia krawędziowego. Ściany komory silosu o średnicy $d_c = 6$ m zamodelowano



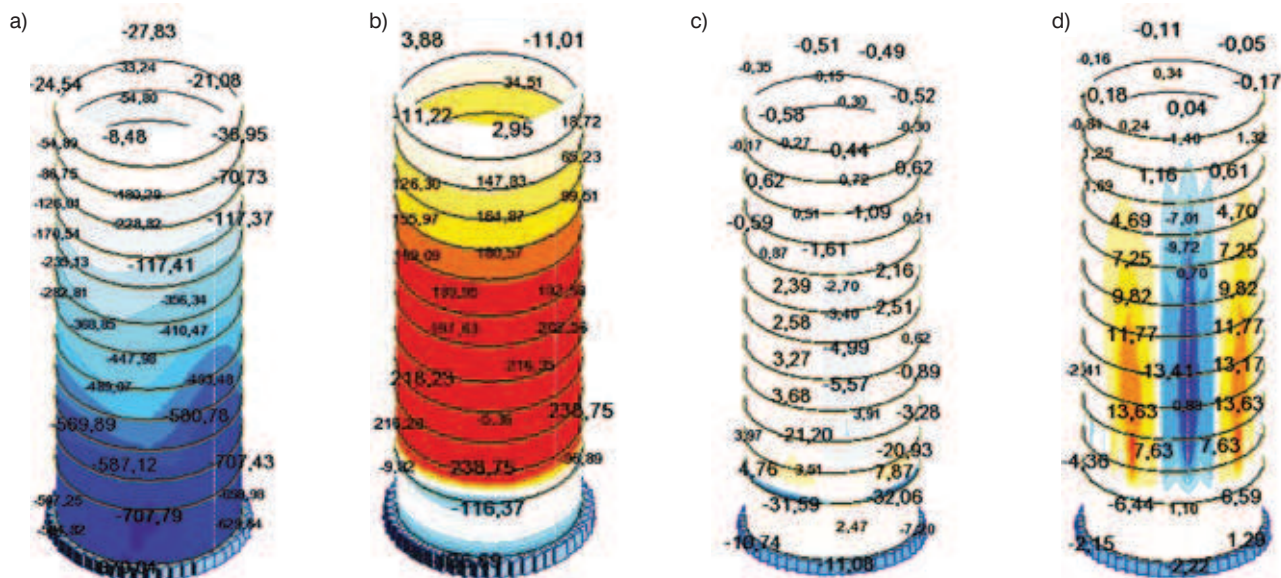
Rys. 4.2. Obciążenie parciem poziomym komory silosu z uwzględnieniem niecentrycznego kanału przepływu przy opróżnianiu: a) $d_c = 6$ m (klasa AAC2), b) $d_c = 10$ m (klasa AAC3)

w postaci 15 pierścieni o wysokości od 1,2 do 2,0 m. Ściany komory silosu o średnicy $d_c = 8$ m zamodelowano w postaci 15 pierścieni o wysokości od 0,8 do 2,0 m, natomiast silosu o średnicy $d_c = 10$ m w postaci 13 pierścieni o wysokości od 2,0 do 2,375 m. Siatkę MES dla silosu o średnicy $d_c = 10$ m zagęszczono dwukrotnie po wysokości silosu w obszarze działania parcia lokalnego, ze względu na wariantowo przykładowe obciążenie lokalne na dowolnej wysokości komory silosu (klasa AAC3).

4.2. Schematy obciążenia silosu

Ciążar własny konstrukcji silosu został uwzględniony bezpośrednio w programie komputerowym [P1]. Konstrukcję silosu obciążono wartościami charakterystycznymi w następujący sposób:

- parcie poziome i styczne przyłożono do każdego pierścienia jako równomierne o wartości parcia obliczonego w środku wysokości tego pierścienia,
- obciążenie lokalne silosów zaliczonych do klasy oceny oddziaływań AAC2 przykładowano w połowie wysokości silosu o wartości $p_{pe} + p_{pei}$, ze względu na składową wartość p_{pei} skierowaną do środka silosu przyłożoną w sposób równomierny na całym obwodzie,



Rys. 4.3. Mapy sił wewnętrznych podczas opróżniania silosu o średnicy $d_c = 10$ m na dużym mimośrodku z uwzględnieniem występowania niecentrycznego kanału przepływu o promieniu równym $r_c = 0,6$ ($d_c/2$) (AAC3, $\theta_c = 22,3^\circ$): a) siły południkowe N [kN/m], b) siły równoleżnikowe R [kN/m], c) momenty południkowe M_N [kNm/m], d) momenty równoleżnikowe M_R [kNm/m]

- obciążenie lokalne silosów zaliczonych do klasy oceny oddziaływań AAC3 przykładano wariantowo po wysokości komory, kolejno w poszczególnych pierścieniach.

4.3. Wyniki obliczeń statycznych

W pracy dyplomowej zamieszczono łącznie 56 wykresów charakterystycznych sił wewnętrznych uzyskanych od kombinacji ciężaru własnego konstrukcji i oddziaływania ośrodka sypkiego w postaci parcia symetrycznego w połączeniu z parciem lokalnym oraz kombinacji ciężaru własnego i obciążenia parciem niesymetrycznym uwzględniającym niecentryczny kanał przepływu

przy opróżnianiu (rys. 4.2). Na rysunku 4.3 pokazano przykładowe mapy sił wewnętrznych w silosie o średnicy $d_c = 10$ m.

5. Analiza porównawcza sił wewnętrznych w ścianie komory silosu

W pracy przeprowadzono analizę jakościową i ilościową otrzymanych wyników z obliczeń statycznych. Do analizy porównawczej sił wewnętrznych w ścianie komory silosu opróżnianego niecentrycznie (tab. 5.1, 5.2) przyjęto trzy poziomy: $0,25h_c$, $0,5h_c$, $0,75h_c$ (h_c – wysokość pionowego segmentu ściany silosu od punktu przejściowego

Tabela 5.1. Ekstremalne wartości sił wewnętrznych w ścianie silosu o średnicy $d_c=10$ m z uwzględnieniem obciążenia lokalnego

Wartości sił wewnętrznych		Poziom z / h_c		
		0,25	0,5	0,75
N [kN/m]	$e_0 = 0,25d_c$	-128,93	-267,79	-417,14
	$e_0 = 0,375d_c$	-137,93	-276,44	-426,79
	$e_0 = 0,5d_c$	-146,39	-284,68	-431,66
R [kN/m]	$e_0 = 0,25d_c$	126,82	213,18	228,26
	$e_0 = 0,375d_c$	139,09	221,04	253,38
	$e_0 = 0,5d_c$	144,14	232,03	263,44
M_N [kNm/m]	$e_0 = 0,25d_c$	0,76	2,9	1,46
	$e_0 = 0,375d_c$	1,83	3,61	3,57
	$e_0 = 0,5d_c$	2,32	4,61	4,47
M_R [kNm/m]	$e_0 = 0,25d_c$	4,43	9,05	6,76
	$e_0 = 0,375d_c$	6,28	10,42	10,61
	$e_0 = 0,5d_c$	7,31	12,34	12,42

Tabela 5.2. Ekstremalne wartości sił wewnętrznych w ścianie silosów opróżnianych na dużym mimośrodku z uwzględnieniem występowania niecentrycznego kanału przepływu

Średnica silosu	Wartości sił wewnętrznych		Poziom z / h_c		
			0,25	0,5	0,75
$d_c = 6$ m (AAC2)	N [kN/m]	$\theta_c = 35^\circ$	-200,47	-380,37	-494,06
	R [kN/m]		62,93	82,53	92,51
	M_N [kNm/m]		-7,12	-9,23	-7,86
	M_R [kNm/m]		-31,28	-41,08	-34,34
$d_c = 8$ m (AAC2)	N [kN/m]		-398,54	-565,5	-525,64
	R [kN/m]		100,88	148,79	172,41
	M_N [kNm/m]		-11,38	-15,31	-12,88
	M_R [kNm/m]		-46,88	-63,38	-51,07
$d_c = 10$ m (AAC3)	N [kN/m]	$G = 0,25$	-97,51	-232,55	-398,24
		$G = 0,4$	-112,27	-254,48	-433,87
		$G = 0,6$	-131,26	-308,19	-487,33
	R [kN/m]	$G = 0,25$	101,05	165,67	195,77
		$G = 0,4$	113,35	173,13	201,99
		$G = 0,6$	113,5	173,39	205,98
	M_N [kNm/m]	$G = 0,25$	-1,09	-2,31	-2,89
		$G = 0,4$	-1,7	-3,39	-4,33
		$G = 0,6$	-2,39	-4,65	-5,58
	M_R [kNm/m]	$G = 0,25$	-5,78	-11,34	-13,89
		$G = 0,4$	-8,54	-16,34	-19,91
		$G = 0,6$	-11,47	-20,82	-23,05

Tabela 5.3. Porównanie procentowe wartości momentów równoleżnikowych na poziomie $z/h_c = 0,5$ obliczonych z uwzględnieniem występowania obciążeń lokalnych

Średnica silosu	Wartości momentów równoleżnikowych M_R [kNm/m]				
	$e_0 = 0,25d_c$	$e_0 = 0,375d_c$	%	$e_0 = 0,5d_c$	%
$d_c = 6$ m	2,77	3,39	22,4	4,25	53,4
$d_c = 8$ m	5,01	6,04	20,6	7,5	49,7
$d_c = 10$ m	9,05	10,42	15,1	12,34	36,4

Tabela 5.4. Porównanie procentowe wartości sił równoleżnikowych obliczonych z uwzględnieniem występowania kanału przepływu do wartości obliczonych na mimośrodku granicznym $e_0 = 0,25d_c$

Poziom z/h_c	Wartości sił równoleżnikowych R [kN/m]						
	$e_0 = 0,25d_c$	$G = 0,25$	%	$G = 0,4$	%	$G = 0,6$	%
0,25	126,82	101,05	20,3	113,35	10,6	113,5	10,5
0,5	213,18	165,67	22,3	173,13	18,8	173,39	18,7
0,75	228,26	195,77	14,2	201,99	11,5	205,98	9,8

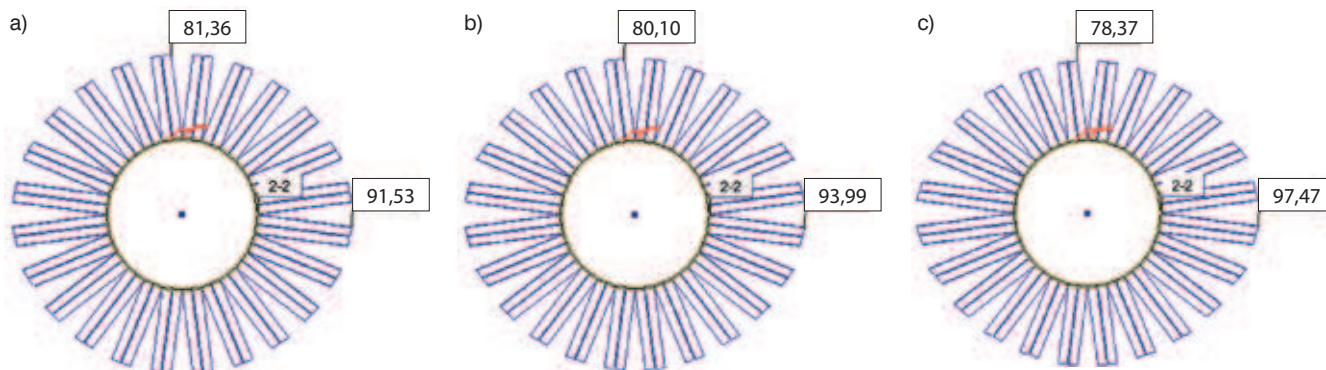
do powierzchni zastępczej, rys. 2.1). W pracy dyplomowej tabelarycznie przedstawiono procentowe porównanie wybranych wartości sił wewnętrznych w ścianie silosu oraz ekstremalne wartości sił wewnętrznych w ścianie silosu na rozpatrywanym poziomie. Również opracowano wykresy kolumnowe przedstawiające:

- wpływ geometrii kanału przepływu na wielkość sił wewnętrznych w ścianie silosu,
- porównanie wartości sił wewnętrznych w ścianie silosu obliczonych z uwzględnieniem występowania obciążeń lokalnych,
- rozkłady sił i momentów w przekrojach poziomych oraz pionowych ścian komory silosu.

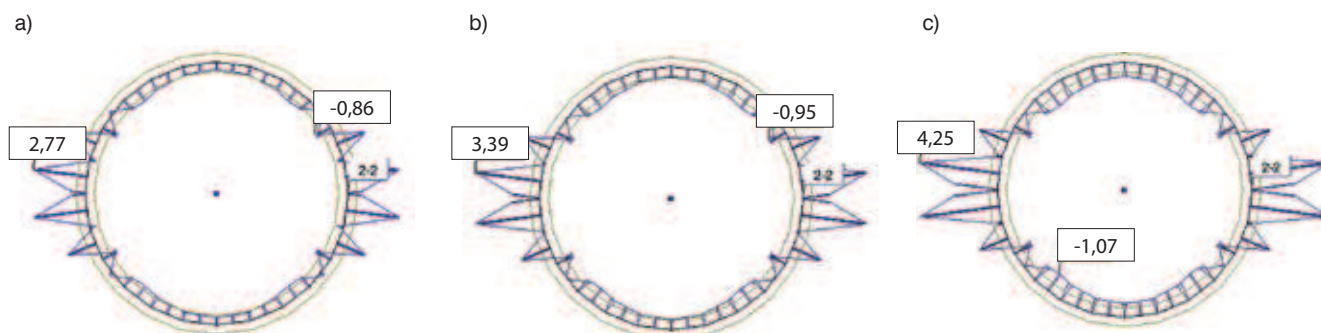
Poniżej przedstawiono wybrane wyniki analizy

Tabela 5.5. Porównanie procentowe wartości momentów równoleżnikowych obliczonych z uwzględnieniem występowania kanału przepływu do wartości obliczonych na mimośrodku granicznym $e_0 = 0,25d_c$

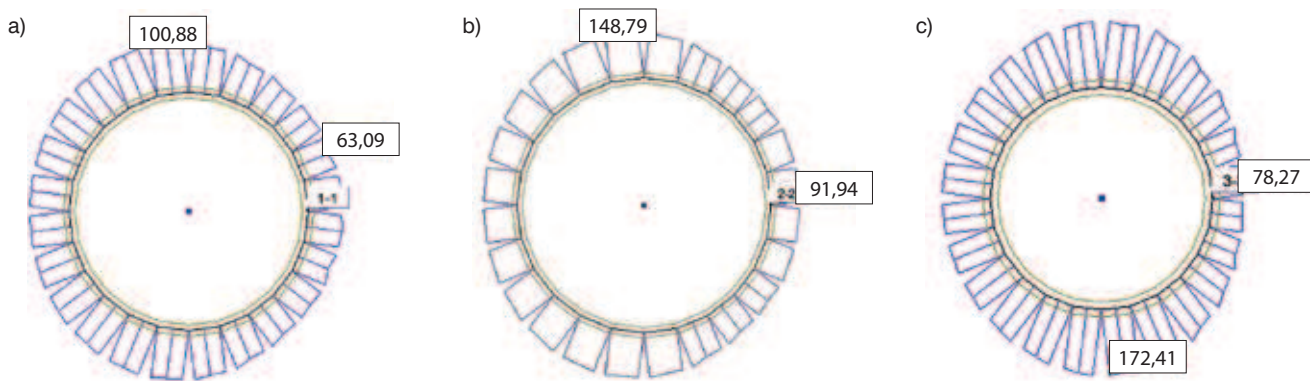
Poziom z/h_c	Wartości momentów równoleżnikowych M_R [kNm/m]						
	$e_0 = 0,25d_c$	$G = 0,25$	%	$G = 0,4$	%	$G = 0,6$	%
0,25	4,43	-5,78	30,5	-8,54	92,8	-11,47	158,9
0,5	9,05	-11,34	25,3	-16,34	80,6	-20,82	130,1
0,75	6,76	-13,89	105,5	-19,91	194,5	-23,05	241,0



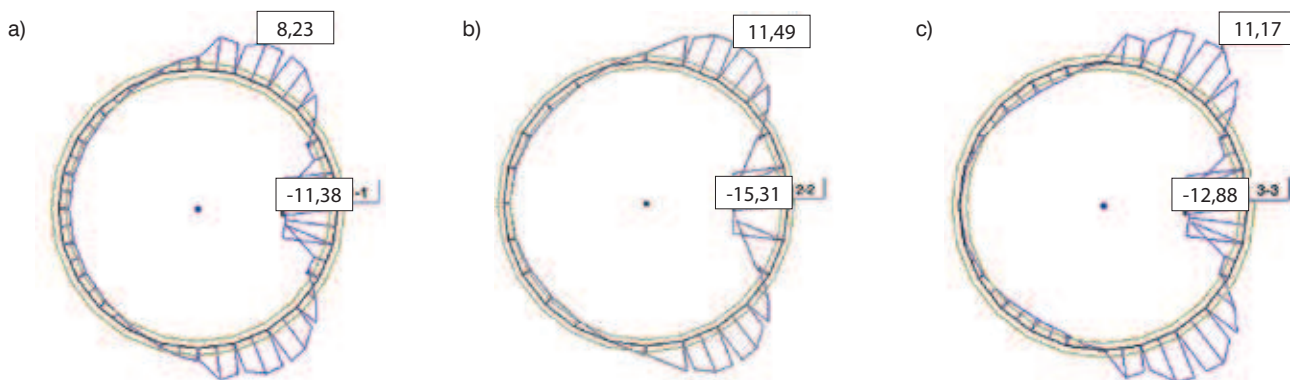
Rys. 5.1. Wykresy sił równoleżnikowych R , kN/m ($z/h_c = 0,5$; $d_c = 6$ m): a) $e_0 = 0,25d_c$, b) $e_0 = 0,375d_c$, c) $e_0 = 0,5d_c$



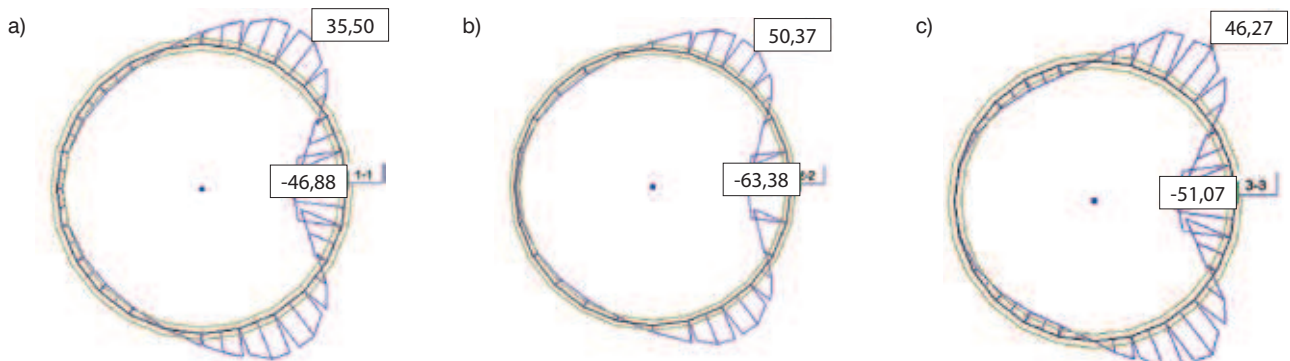
Rys. 5.2. Wykresy momentów równoleżnikowych M_R , kN/m ($z/h_c = 0,5$; $d_c = 6$ m): a) $e_0 = 0,25d_c$, b) $e_0 = 0,375d_c$, c) $e_0 = 0,5d_c$



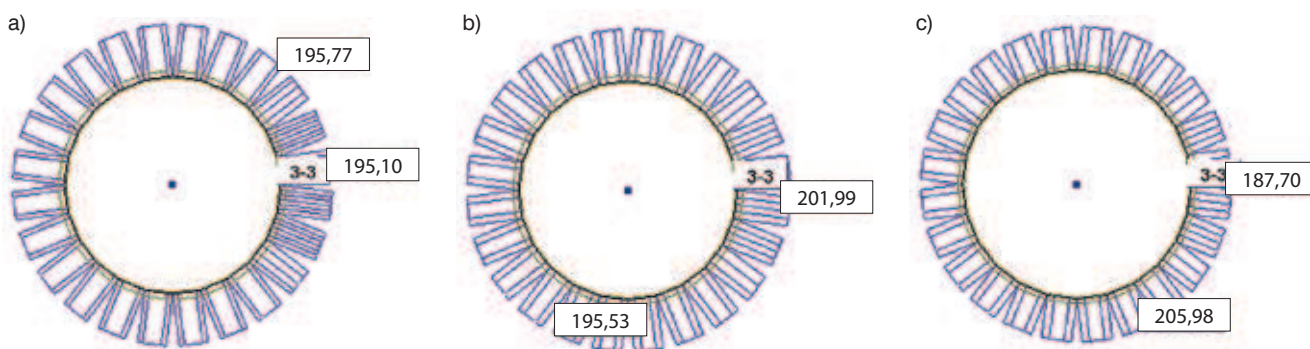
Rys. 5.3. Wykresy sił równoleżnikowych R , kN/m ($\theta_c = 35^\circ$; $d_c = 8$ m, AAC2): a) $z / h_c = 0,25$, b) $z / h_c = 0,5$, c) $z / h_c = 0,75$



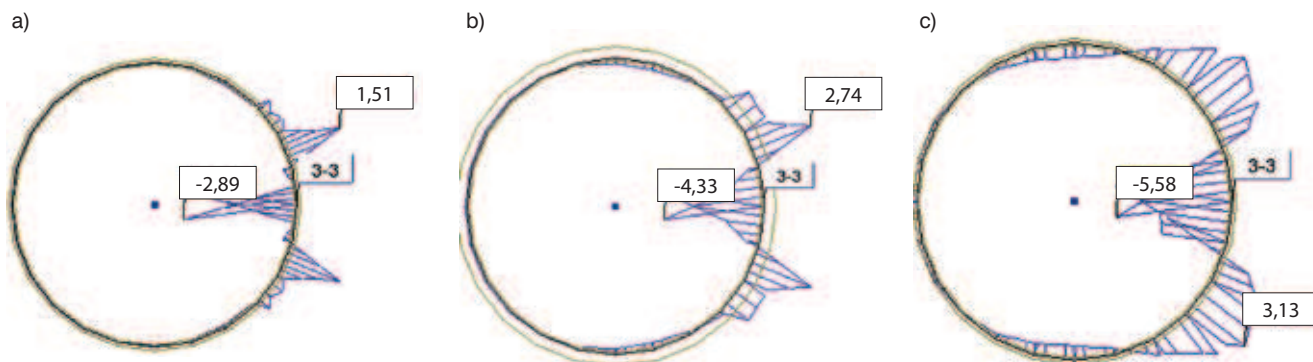
Rys. 5.4. Wykresy momentów południkowych M_N , kNm/m ($\theta_c = 35^\circ$; $d_c = 8$ m, AAC2): a) $z / h_c = 0,25$, b) $z / h_c = 0,5$, c) $z / h_c = 0,75$



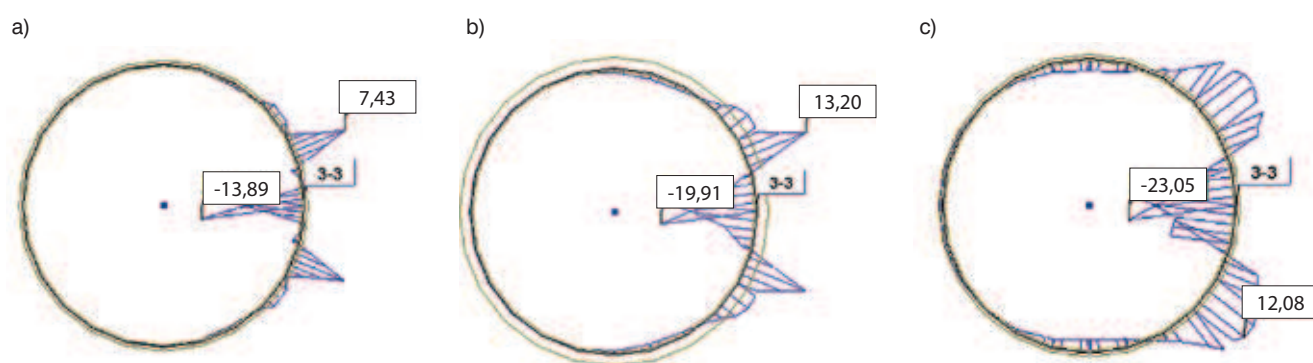
Rys. 5.5. Wykresy momentów równoleżnikowych M_R , kNm/m ($\theta_c = 35^\circ$; $d_c = 8$ m, AAC2): a) $z / h_c = 0,25$, b) $z / h_c = 0,5$, c) $z / h_c = 0,75$



Rys. 5.6. Wykresy sił równoleżnikowych R , kN/m ($z / h_c = 0,75$; $d_c = 10$ m, AAC3): a) $G = 0,25$, b) $G = 0,4$, c) $G = 0,6$



Rys. 5.7. Wykresy momentów południkowych M_N , kNm/m ($z / h_c = 0,75$; $d_c = 10$ m, AAC3): a) $G = 0,25$, b) $G = 0,4$, c) $G = 0,6$



Rys. 5.8. Wykresy momentów równoleżnikowych M_R , kNm/m ($z / h_c = 0,75$; $d_c = 10$ m, AAC3): a) $G = 0,25$, b) $G = 0,4$, c) $G = 0,6$

porównawczej w postaci tabel i wykresów sił wewnętrznych w ścianie silosu. W tabelach 5.3, 5.4 i 5.5 obliczono przyrosty sił wewnętrznych w ścianie silosu opróżnianego na dużych mimośrodkach ($e_0 = 0,375d_c$, $e_0 = 0,5d_c$) w odniesieniu do granicznego przypadku małego mimośrodu $e_0 = 0,25d_c$.

Podsumowanie

W pracy dyplomowej opracowano czternaście wariantów testów numerycznych cylindrycznego silosu wolno stojącego na pszenicę o trzech różnych średnicach komory silosu ($d_c = 6$ m, $d_c = 8$ m, $d_c = 10$ m) i trzech wariantach mimośrodu podczas opróżniania ($e_0 = 0,25d_c$, $e_0 = 0,375d_c$, $e_0 = 0,5d_c$). Wszystkie kombinacje obciążeń od parcia ośrodka sypkiego w fazie opróżniania silosów o średnicy komory $d_c = 6$ m oraz $d_c = 8$ m zaliczono do klasy oceny oddziaływań AAC2, natomiast silosy o średnicy $d_c = 10$ m opróżniane na dużym mimośrodku zakwalifikowano do klasy AAC3. W silosach zaliczonych do klasy AAC3 przeprowadzono obliczenia dla trzech wartości promienia kanału przepływu ($r_c = 0,25r$, $r_c = 0,4r$, $r_c = 0,6r$).

W pracy przeprowadzono weryfikację wybranych wyników obliczeń numerycznych (MES) za pomocą wzorów analitycznych z teorii błonowej powłok. Uzyskano dobrą zbieżność wartości sił wewnętrznych w cylindrycznej ścianie silosu.

Na podstawie wykonanej analizy w zakresie wyznaczenia kombinacji obciążeń od parcia materiału sypkiego w rozpatrywanych cylindrycznych komorach silosu na pszenicę przy niecentrycznym opróżnianiu i uzyskanych wyników obliczeń statycznych (MES) sformułowano poniższe wnioski.

- Wraz ze wzrostem mimośrodu podczas opróżniania zwiększa się wartość obciążeń lokalnych w silosie.
- Wraz ze wzrostem średnicy komory silosu zwiększają się wartości obciążeń lokalnych, parcia poziomego i obciążeń tarcie powierzchniowe.
- Dodatkowy niezależny przypadek od zwiększonego parcia lokalnego uwzględniający niecentryczny kanał przepływu rozpatruje się w przypadku dużego mimośrodu, gdy $e_0 / d_c > 0,25$. Mimośród kanału przepływu e_c nie zależy od wielkości mimośrodu otworu wysypowego e_0 .
- Wraz ze wzrostem promienia kanału przepływu r_c zwiększa się parcie poziome p_{hce} oraz tacie powierzchniowe p_{wce} materiału sypkiego w strefie przepływu.
- Wzrost promienia kanału przepływu r_c nie wpływa na wartości parcia poziomego p_{hse} oraz tarcia powierzchniowego p_{wse} w strefie bezruchu.
- Wraz ze wzrostem promienia kanału przepływu r_c zmniejsza się parcie poziome krawędziowe p_{hae} oraz tarcie powierzchniowe krawędziowe p_{wae} .
- Kąt θ_c opisujący geometrię kanału przepływu nie

- zależy od promienia silosu, a głównie od właściwości ośrodka rozdrobnionego, tj. kąta tarcia wewnętrznego ϕ , i współczynnika tarcia o ścianę μ .
- Zwiększenie mimośrodowość podczas opróżniania nieznaczająco wpływa na przyrost sił południkowych N w ścianie komory silosu. Większe zróżnicowanie w wartościach tych sił można zaobserwować wraz ze wzrostem średnicy silosu.
 - Większy mimośród podczas opróżniania komory silosu powoduje zwiększenie wartości sił równoleżnikowych R w ścianie.
 - Obciążenie lokalne powoduje zaburzenie błonowej pracy powłoki, co skutkuje powstaniem momentów południkowych M_N oraz od dwu do trzech razy większych od nich momentów równoleżnikowych M_R .
 - Przyrost średnicy komory silosu oraz wzrost mimośrodowość podczas opróżniania powodują zwiększenie momentów południkowych M_N oraz równoleżnikowych M_R w ścianie silosu.
 - Nierównomierny rozkład parcia w silosie uwzględniający niecentryczny kanał przepływu ośrodka sypkiego powoduje powstawanie momentów południkowych M_N oraz od czterech do pięciu razy większych momentów równoleżnikowych M_R .
 - Wzrost promienia kanału przepływu z $r_c = 0,25r$ na $r_c = 0,4r$ powoduje zwiększenie wartości momentów równoleżnikowych ok. 43–78%. Natomiast przy promieniu kanału przepływu równym $r_c = 0,6r$ w odniesieniu do $r_c = 0,25r$ przyrost wartości momentów równoleżnikowych mieści się w granicach 45–98%.
 - W przypadku występowania obciążeń lokalnych w silosie na pszenicę o średnicy $d_c = 10\text{ m}$ uzyskano większe wartości sił równoleżnikowych niż podczas uwzględnienia występowania kanału przepływu (maksymalne różnice wynoszą około 22%). Z kolei niecentryczny kanał przepływu powoduje ponad dwukrotnie większe wartości momentów równoleżnikowych oraz południkowych niż w przypadku obciążeń lokalnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Halicka A., Franczak D., Projektowanie zbiorników żelbetowych, tom 1, Zbiorniki na materiały sypkie, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2011
- [2] Kobiak J., Stachurski W., Konstrukcje żelbetowe, tom IV, Arkady, Warszawa 1991
- [3] Mitzel A., Budownictwo betonowe, tom XIII, Arkady, Warszawa 1969
- [4] Niedostatkiwicz M., Badania deformacji w materiałach sypkich podczas dynamicznego przepływu w silosach, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2014
- [5] Więckowski Z., Modelowanie przepływu materiału sypkiego metodą punktów materialnych, Politechnika Łódzka, Łódź 2012
- [6] Tejchman J., Budownictwo przemysłowe: obliczanie i konstrukcja silosów, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2010
- [7] Łapko A., Efekty oddziaływania materiału sypkiego na żelbetowe ściany komór w eksploatowanych silosach na zboże, Politechnika Białostocka, Białystok 1989
- [8] Dietrich L., Trąpczyński W., Doświadczalne metody wyznaczania parć ośrodków sypkich w silosach, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 1988

- [9] Drescher A., Metody obliczeń parć i przepływu materiałów ziarnistych w zbiornikach, PWN, Warszawa 1983
- [10] Kobiak S., Klimek A., Problemy przepływu materiałów sypkich w silosach i sposoby ich rozwiązania, Materiały X Konferencji Naukowo Technicznej: Żelbetowe i sprężone zbiorniki, Kraków 1995
- [11] Kobiak S., Klimek A., O projektowaniu silosów ze względu na przepływ materiałów sypkich, Inżynieria i Budownictwo nr 8/1996
- [12] Starosolski W., Komputerowe modelowanie betonowych ustrojów inżynierskich, Wybrane zagadnienia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009
- [13] Łapko A., Prusiel J., Analiza ścian silosów cylindrycznych pod obciążeniem lokalnym typu ścieżkowego, Inżynieria i Budownictwo nr 9/2007
- [14] Łapko A., Stachurski W., Doświadczalne określenie efektów działania materiału sypkiego na ściany silosów przy różnym usytuowaniu otworów wyspowych, Inżynieria i Budownictwo nr 8/1984
- [15] Łapko A., Modele oddziaływań ośrodka ziarnistego na konstrukcje silosów według PN-EN 1991-4, Inżynieria i Budownictwo nr 9/2007
- [16] Nowacki W., Dąbrowski R., Silosy. Metody obliczeń i konstrukcja, Budownictwo i Architektura, Warszawa 1955
- [17] Reimbert M., Reimbert A., Silosy. Teoria i praktyka, Arkady, Warszawa 1959
- [18] Rybiański M., Kramnik J., Parcia materiału sypkiego w zbiornikach o różnych rodzajach przepływu, Inżynieria i Budownictwo nr 6/1991
- [19] Tejchman J., Niedostatkiwicz M., O redukcji efektów dynamicznych podczas opróżniania silosów, Inżynieria i Budownictwo nr 6/1998
- [20] Więckowski Z., Modelowanie przepływu materiału sypkiego w zbiorniku, Inżynieria i Budownictwo nr 4/2003
- [21] Siennicki G., Domaszewski H., Kłoś Cz., Zbiorniki materiałów sypkich, Budownictwo i Architektura, 1955
- [22] Budziński M., Obliczenia i wymiarowanie płyt żelbetowych w układach przestrzennych i płaskich, Robotat
- [23] Kamiński M., Zubrzycki M., Żelbetowe silosy na zboże. Badania i projektowanie, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1985

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [N1] PN-EN 1990:2004: Eurokod 0. Podstawy projektowania konstrukcji
- [N2] PN-EN 1991-1-1:2004: Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje Część 1-1: Oddziaływania ogólne
- [N3] PN-EN 1991-4:2008: Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki
- [N4] PN-EN 1992-1-3:2008: Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [N5] PN-EN 1992-3: Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze
- [N6] PN-B-03262:2002: Silosy żelbetowe na materiały sypkie. Obliczenia statyczne, projektowanie, wykonawstwo i eksploatacja
- [N7] <http://www.silosystem.pl/>
- [S1] Żelbetowe zbiorniki na materiały sypkie. Podstawy projektowania według norm europejskich. <http://www.inzynierbudownictwa.pl/>
- [P1] Autodesk – Robot Structural Analysis Professional 2015 – wersja studencka
- [P2] Autodesk – AutoCAD 2015 – wersja studencka
- Krzysztof Gieriej: Analiza numeryczna silosu cylindrycznego opróżnianego niecentrycznie. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Białostocka, Białystok 2015 (rok akademicki 2014/2015). Praca została nagrodzona w Konkursie „Na Najlepsze Prace Dyplomowe Absolwentów Studiów Wyższych Kierunku Budownictwo”. Konkurs zorganizowany został przez PZITB Oddział w Białymstoku oraz Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej.**
- Praca otrzymała Wyróżnienie Rady Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej, Białystok 16.09.2015.**

Za publikację w miesięczniku „Przegląd Budowlany” uzyskuje się 5 punktów

zgodnie z komunikatem MNIŚW z dnia 23.12.2015 roku, wykaz B, pozycja 1381.