

# BUDOWA I ANALIZA MODELU NUMERYCZNEGO KONSTRUKCJI TEORETYCZNEGO OBIEKTU BUDOWLANEGO

Przemysław LAZAR\*

Główny Instytut Górnictwa, plac Gwarków 1, 40-166 Katowice

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia przebieg budowy i analizy obliczeniowej modelu kilkukondygnacyjnego budynku o konstrukcji ścianej poddanego standardowym obciążeniom budowlanym oraz oddziaływaniom górniczych deformacji podłoża w postaci poziomych odkształceń rozciągających podłoża górniczego i krzywizny wypukłej terenu górniczego. Proces modelowania budynku oraz jego analiza obliczeniowa wykonana została z wykorzystaniem programu Autodesk Robot Structural Analysis, który okazał się narzędziem przydatnym do wykonywania takich prac. Na podstawie wykonanej analizy obliczeniowej wykazano istotną rolę poziomych odkształceń rozciągających podłoża gruntowego w powodowaniu uszkodzeń obiektów budowlanych zlokalizowanych na terenach górniczych.

*Słowa kluczowe:* budynki, oddziaływania górnicze, analiza obliczeniowa.

## 1. Wprowadzenie

Stosowanie metod numerycznych przy projektowaniu obiektów budowlanych jest obecnie powszechne. Najczęściej do tego celu wykorzystywane są specjalistyczne programy obliczeniowe umożliwiające wykonywanie analiz statycznych i dynamicznych konstrukcji nośnej i usztywniającej obiektów, często rozbudowane o moduły umożliwiające także wymiarowanie poszczególnych elementów konstrukcyjnych obiektów (Starosolski, 2010). Programy numeryczne są również wykorzystywane do oceny wpływu oddziaływań górniczych na budynki (Fedorowicz L., 2006; Fedorowicz J., 2009; Szojda, 2009). Szczególne znaczenie ma odwzorowanie poziomych odkształceń terenu (Kwiatek, 2007; Kawulok, 2010). Przykładem takiego programu jest Autodesk Robot Structural Analysis (ARSA) oferujący bardzo szeroki zakres możliwości w zakresie modelowania i obliczania różnych typów i rodzajów konstrukcji budowlanych wraz z ich wymiarowaniem, umożliwiając faktycznie tworzenie projektów konstrukcyjnych budynków i innych obiektów budowlanych (Autodesk, 2010).

W niniejszym artykule przedstawiono przykład zastosowania programu Autodesk Robot Structural Analysis do analizy obliczeniowej budynku usytuowanego na terenie górnym. Przedmiotem rozważań był przykładowy budynek mieszkalny o wysokości trzech kondygnacji, w pełni podpiwniczony, zaprojektowany

w ścianej konstrukcji betonowej, poddany standardowym obciążeniom stałym i zmiennym oraz oddziaływaniom górniczym w postaci deformacji jego podłoża gruntowego, wyrażonego poziomymi odkształceniami rozciągającym oraz krzywizną terenu górniczego.

## 2. Budowa modelu budynku o ścianowym ustroju nośnym

Proces tworzenia modelu geometrycznego i statyczno-wytrzymałościowego rozpatrywanego budynku składał się z następujących etapów:

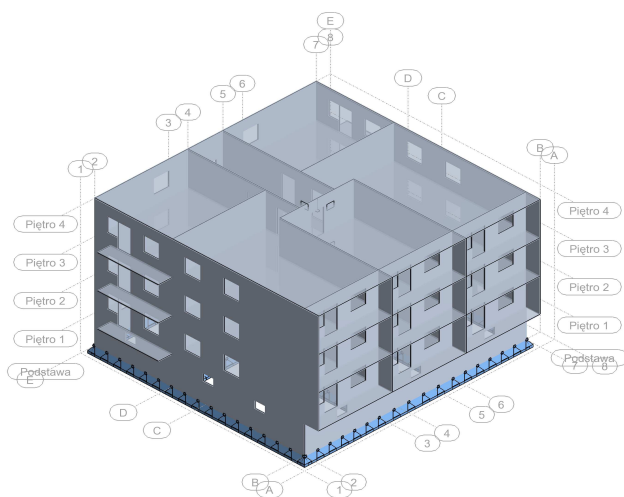
- zdefiniowanie osi konstrukcyjnych budynku w trzech kierunkach  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;
- zamodelowanie ścian konstrukcyjnych kondygnacji piwnic i stropu nad piwnicami;
- wykształcenie otworów okiennych i drzwiowych poprzez wykonanie odpowiedniej perforacji ścian konstrukcyjnych budynku;
- zamodelowanie kondygnacji parteru, w sposób analogiczny do kondygnacji piwnic;
- skopiowane kondygnacji parteru w poziomie I i II piętra budynku;
- korekta kształtu stropu nad II piętrzem;
- wygenerowanie modelu obliczeniowego budynku łącznie z przyjęciem siatki metody elementów skończonych, wykonywane automatycznie przez program ARSA.

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: przemyslawlazar@gmail.com

Ściany piwniczne przyjęte zostały jako ściany z betonu o grubości 12 cm. W poziomie fundamentów zamodelowano sztywne podparcie ścian – tarcz na pełnych krawędziach dolnych, blokując wszystkie kierunki przemieszczeń: x, y, z oraz kąty obrotu względem osi: x-x, y-y, z-z. Połączenia pomiędzy poszczególnymi ścianami konstrukcyjnymi automatycznie zdefiniowane zostały jako sztywne. Płyta stropowa kondygnacji piwnic przyjęta została jako płyta betonowa o grubości 12 cm, z wykształconym otworem w miejscu usytuowania klatki schodowej. Elementy konstrukcyjne klatki schodowej oraz ściany działowe kondygnacji piwnic zostały pominięte w celu uproszczenia modelu budynku. Połączenia pomiędzy płytą stropową nad kondygnacją piwniczną a ścianami piwnicznymi wygenerowane zostały automatycznie jako przegubowe.

Elementy konstrukcyjne parteru budynku zamodelowano w sposób analogiczny do elementów piwnicy z tą różnicą, że płyta stropowa nad parterem objęła swoim zasięgiem także balkony i loggie. Kolejne piętra budynku uzyskano następnie poprzez skopiowanie wszystkich elementów parteru na nadległych kondygnacjach. W poziomie stropu nad II piętrem (poziom stropodachu budynku) dokonano korekty kształtu płyty stropowej rezygnując z otworu w miejscu usytuowania klatki schodowej oraz likwidując wspornikowe płyty balkonowe.

Opracowany model, który przyjęty został jako model podstawowy rozpatrywanego budynku, zaprezentowany został na rysunku 1. W ramach dokonanej analizy obliczeniowej oprócz modelu podstawowego analizowano również model dodatkowy, pozbawiony otworów okiennych i drzwiowych w ścianach konstrukcyjnych budynku.



Rys. 1. Podstawowy model budynku

### 3. Modelowanie obciążeń budynku

Obciążenia, jakim poddany został model budynku, podzielono na dwie kategorie: standardowe obciążenia budynków oraz oddziaływania górnicze. Obciążenia standardowe są typowymi obciążeniami obiektów

budowlanych oddziałującymi na obiekty na terenie całego kraju, niezależnie od tego, czy są to tereny górnicze czy niegórnicze. Do obciążeń tych należą:

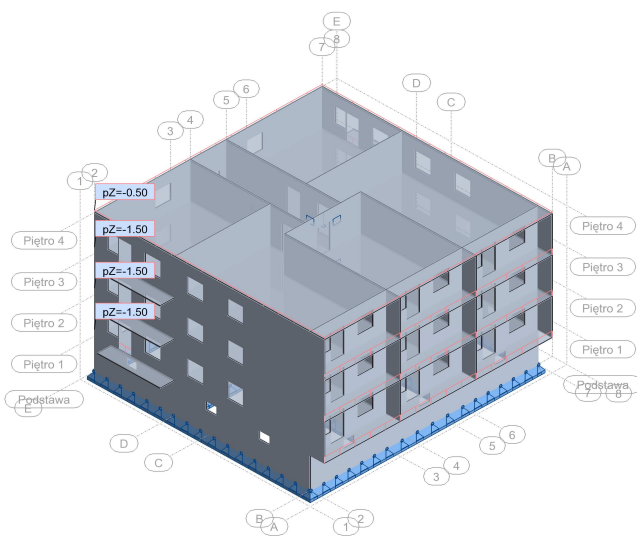
- obciążenia stałe (na przykład od ciężaru własnego),
- obciążenia zmienne długo- i krótkotrwałe (obciążenia użytkowe),
- obciążenia klimatyczne (śniegiem, wiatrem, itp.).

Obciążenie od ciężaru własnego dotyczy wszystkich elementów konstrukcyjnych zdefiniowanych w modelu i działa w kierunku osi „z” globalnego układu współrzędnych ze zwrotem w dół. Obciążenie to występuje jako obciążenie powierzchniowe, liniowe lub węzłowe o wartościach odpowiadających ciężarom zdefiniowanych elementów. Obciążenie to wygenerowane zostało automatycznie przez program ARSA.

Jako obciążenie użytkowe przyjęte zostało pionowe obciążenie stropów wszystkich kondygnacji modelu. Jest to obciążenie równomiernie rozłożone na stropach wszystkich kondygnacji modelu, o wartości:

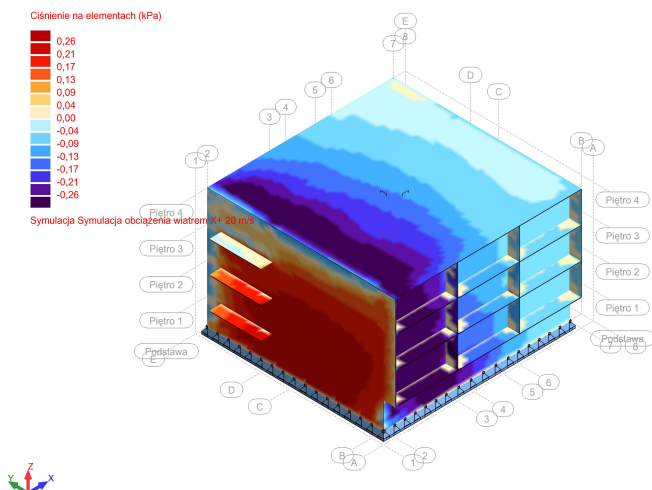
- 1,5 kN/m<sup>2</sup> – w przypadku stropów na piwnicą, parterem i I piętrem,
- 0,5 kN/m<sup>2</sup> – w przypadku stropu nad II piętrem, stanowiącego element stropodachu wieńczącego rozważany budynek.

Schemat obciążenia użytkowego pokazany został na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat obciążenia obciążeniem użytkowym

Obciążenie wiatrem wygenerowane zostało automatycznie przez program ARSA dla dwóch kierunków: równoległego do osi x oraz równoległego do osi y. W dalszej analizie przy tworzeniu kombinacji obciążeń wykorzystano bardziej niekorzystne obciążenie modelu wiatrem, działające równoległe do osi x. Schemat tego obciążenia zaprezentowany został na rysunku 3.

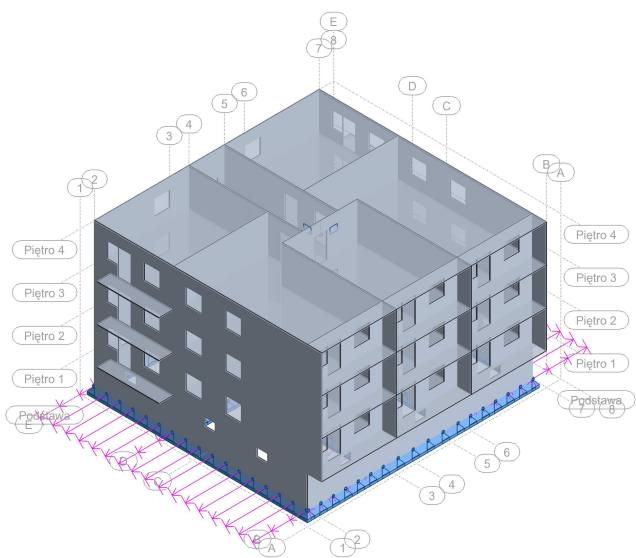


Rys. 3. Schemat obciążenia wiatrem wzdłuż osi x

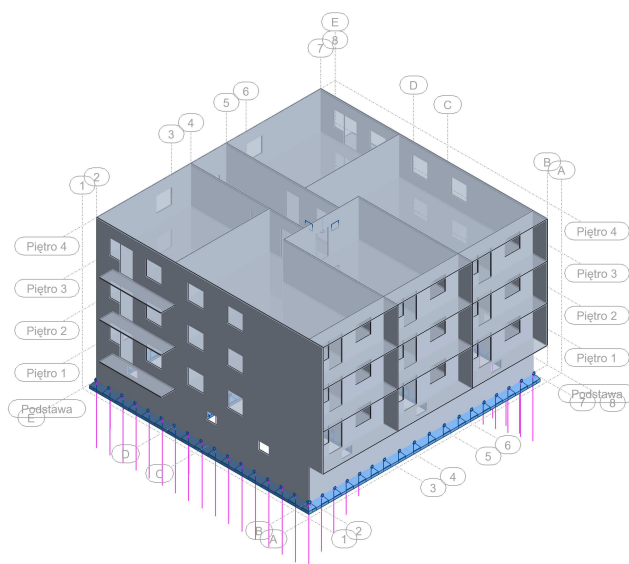
Do kategorii oddziaływań górniczych zaliczono oddziaływania przyłożone do dolnych krawędzi ścian w wyniku wpływów deformacji ciągłych podłoża górniczego. Oddziaływania te rozdzielono na:

- przemieszczenia poziome od poziomych odkształceń rozciągających  $\varepsilon$  powstających w podłożu obiektów budowlanych;
- przemieszczenia pionowe tego podłoża, w postaci krzywizny wypukłej powierzchni terenu o promieniu R.

Powyższe oddziaływania zamodelowane zostały w postaci wymuszonych przemieszczeń przyłożonych do węzłów siatki metody elementów skończonych, leżących w płaszczyźnie podstawy modelu budynku. Wartości tych oddziaływań wyliczono przy przyjęciu wskaźników deformacji terenu górniczego III kategorii, czyli dla wartości odkształceń poziomych  $\varepsilon = 6,0$  mm/m oraz promienia krzywizny terenu  $R = 6,0$  km (Ochrona obiektów, 1997). Schematy oddziaływań górniczych na elementy podstawy modelu pokazane zostały na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Schemat oddziaływania poziomych odkształceń podłoża



Rys. 5. Schemat oddziaływania krzywizny wypukłej terenu

#### 4. Analiza obliczeniowa

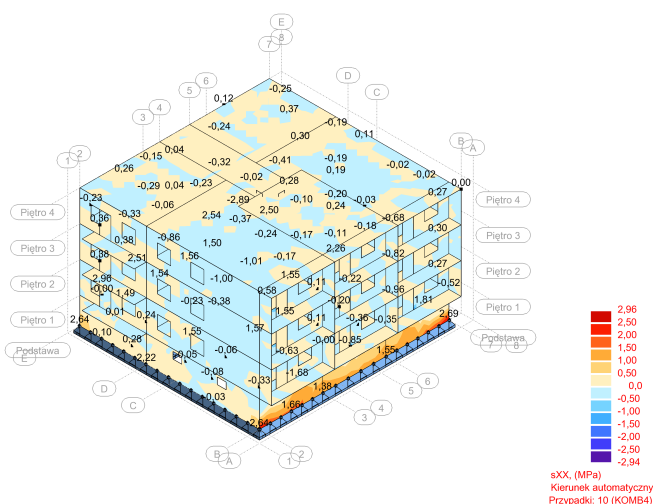
Analiza obliczeniowa rozpatrywanego modelu podstawowego budynku pod działaniem założonych obciążeń i oddziaływań przeprowadzona została dla:

- a) 6 przypadków prostych – obejmujących skutki indywidualnego oddziaływania poszczególnych rodzajów obciążeń na przyjęty model, a w szczególności:
  - obciążenie ciężarem własnym (P1),
  - obciążenie użytkowe (P2),
  - symulacja obciążenia wiatrem w kierunku osi x (P3),
  - symulacja obciążenia wiatrem w kierunku osi y (P4),
  - oddziaływania górnicze od rozpełzania gruntu  $e$  w kierunku równoległym do osi x (P5),
  - oddziaływania górnicze od wypukłej krzywizny terenu o promieniu R w kierunku równoległym do osi x (P6);
- b) 5 kombinacji obciążeń (przypadków złożonych) – utworzonych jako kombinacje dwóch do pięciu przypadków prostych obciążenia, a w szczególności:
  - kombinacja K1 (P7) – utworzona z przypadków P1 i P2,
  - kombinacja K2 (P8) – utworzona z przypadków P1, P2 i P3,
  - kombinacja K3 (P9) – utworzona z przypadków P1, P2, P3 i P5,
  - kombinacja K4 (P10) – utworzona z przypadków P1, P2, P3 i P6,
  - kombinacja K5 (P11) – utworzona z przypadków P1, P2, P3, P5 i P6.

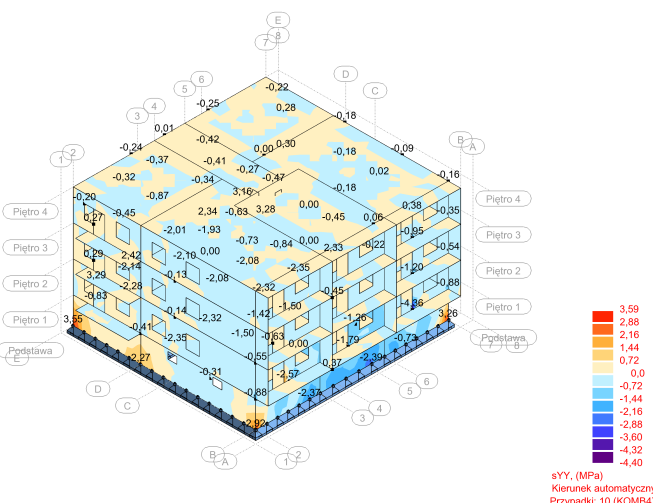
Obliczenia statyczne wykonane przy wykorzystaniu programu ARSA mogą być przez ten program prezentowane na wiele różnych sposobów, w tym między innymi w postaci:

- map izolinii naprężeń, normalnych  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\tau_{xy}$  oraz głównych  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,
- map barwnych rozkładu naprężeń,
- wartości naprężeń podanych dla wybranych punktów siatki elementów skończonych modelu,
- odkształceń i przemieszczeń poszczególnych elementów i fragmentów modelu.

W wykonanej pracy skoncentrowano się na analizie rozkładu naprężeń normalnych przedstawionych na mapach barwnych rozkładu tych naprężeń w poszczególnych elementach modelu, wzbogaconych wartościami liczbowymi naprężeń w wybranych punktach modelu. Przykładowe rezultaty wykonanych obliczeń zaprezentowane zostały na rysunkach 6 i 7, odnoszących się do kombinacji K5 obciążeń.



Rys. 6. Wyniki analizy naprężeń  $\sigma_x$  od kombinacji oddziaływań złożonej z ciężaru własnego, obciążeń eksploatacyjnych, obciążeń wiatrem, poziomych odkształceń rozciągających i wypukłej krzywizny terenu



Rys. 7. Wyniki analizy naprężeń  $\sigma_y$  od kombinacji oddziaływań złożonej z ciężaru własnego, obciążeń eksploatacyjnych, obciążeń wiatrem, poziomych odkształceń rozciągających i wypukłej krzywizny terenu

## 5. Omówienie wyników przeprowadzonych obliczeń

Wyniki wykonanej analizy obliczeniowej rozpatrywanego modelu budynku dostarczyły licznych obserwacji i spostrzeżeń dotyczących rozkładu sił wewnętrznych w konstrukcji budynku znajdującego się pod działaniem poszczególnych obciążeń standardowych oraz oddziaływań o charakterze górniczym. Biorąc pod uwagę możliwość praktycznego wykorzystania otrzymanych rezultatów obliczeń pod kątem oceny wpływu oddziaływań górniczych na pracę statyczną analizowanego modelu budynku, w niniejszym artykule skoncentrowano się na określeniu rozkładu naprężeń normalnych, który wystąpił w ścianie nośnej kondygnacji piwnicy w osi B-B (ściana pod loggiami). Przy modelowaniu obciążeń budynku oddziaływania górnicze w postaci poziomego odkształcenia oraz krzywizny terenu przyjęto bowiem jako wpływy oddziałujące równoległe do osi x globalnego układu współrzędnych, czyli równoległe do osi konstrukcyjnej B-B.

Analizując mapy naprężeń normalnych, uzyskane dla wspomnianej ściany piwnic budynku stwierdzić można, że:

- w wyniku obciążenia modelu ciężarem własnym w kierunku poziomym powstały naprężenia o wartościach od  $-0,05$  do  $-0,20$  MPa, a w kierunku pionowym również naprężenia ściskające o wartościach od  $-0,10$  do  $-0,80$  MPa;
- w wyniku obciążenia modelu obciążeniem użytkowym w kierunku poziomym powstały naprężenia o wartościach od  $-0,01$  do  $-0,04$  MPa, a w kierunku pionowym również naprężenia ściskające i rozciągające o wartościach od  $-0,01$  do  $-0,16$  MPa;
- w wyniku obciążenia modelu obciążeniem wiatrem w kierunku poziomym powstały naprężenia ściskające i rozciągające o wartościach od  $-0,01$  do  $+0,01$  MPa, a w kierunku pionowym również naprężenia ściskające o wartościach od  $-0,01$  do  $+0,02$  MPa;
- w wyniku obciążenia modelu oddziaływaniem poziomych odkształceń rozciągających podłoża (jak dla terenów górniczych III kategorii) w kierunku poziomym powstały naprężenia rozciągające o wartościach od  $0,0$  do  $+2,40$  MPa, a w kierunku pionowym naprężenia ściskające i rozciągające o wartościach od  $-0,01$  do  $+1,50$  MPa;
- w wyniku obciążenia modelu oddziaływaniem wypukłej krzywizny terenu (jak dla terenów górniczych III kategorii) w kierunku poziomym powstały naprężenia rozciągające o wartościach od  $0,0$  do  $+0,08$  MPa, a w kierunku pionowym naprężenia ściskające i rozciągające o wartościach od  $-0,09$  do  $+0,13$  MPa.

Z porównania podanych powyżej wartości naprężeń wynika wniosek, że głównym czynnikiem mogącym powodować wystąpienie uszkodzeń rozpatrywanej ściany konstrukcyjnej kondygnacji piwnic są poziome odkształcenia podłoża górniczego obiektu.

Z wykonanej analizy obliczeniowej wynika, że łączne wpływy wszystkich rozpatrywanych obciążeń i oddziaływań wyrażać się będą powstaniem w kierunku

poziomym naprężen rozciągających od 0,0 do +2,69 MPa, a kierunku pionowym naprężen ściskających i rozciągających w przedziale od -2,39 do +3,26 MPa. Oznacza to, że powstały w rozpatrywanej ścianie rozkład naprężen normalnych jest zdominowany przez oddziaływanie poziomych odkształceń rozciągających podłoża górniczego.

## 6. Podsumowanie

Zrealizowane prace obejmujące budowę modelu kilkukondygnacyjnego budynku o konstrukcji ścianowej, poddanego obciążeniom standardowym oraz oddziaływaniom wpływów górniczych deformacji podłoża, w postaci odkształceń poziomych podłoża górniczego i krzywizny wypukłej terenu górniczego, a następnie wykonanie analizy obliczeniowej rozkładu sił wewnętrznych w przyjętym modelu, wykazały przydatność programu Autodesk Robot Structural Analysis do tego typu prac i analiz.

Przyjęty do analiz budynku jest modelem mocno uproszczonym, zakładającym wykonanie całego modelu w konstrukcji betonowej, bez udziału elementów żelbetowych, takich jak ławy fundamentowe, nadproża okienne i drzwiowe, a także stropowe płyty żelbetowe, pojedynczo lub krzyżowo zbrojone. Wynika stąd, że celowe są dalsze prace nad doskonaleniem sposobu modelowania budynków przy wykorzystaniu programu ARSA i lepszym uwzględnieniu zagadnień kontaktowych budowla – podłoża górnicze.

Uzyskane wyniki obliczeń pozwalają również na stwierdzenie, że wpływ poziomych odkształceń rozciągających podłoża górniczego na możliwość wystąpienia uszkodzeń elementów konstrukcyjnych budynków jest bardzo istotny.

## Literatura

- Autodesk Inc., (2010). Robot Structural Analysis Professional 2010 Training Manual - Metric Version. *Autodesk Inc.*, USA.
- Fedorowicz J. (2009). Zagadnienia kontaktowe budowla – podłoża gruntowe. Część II: Kryteria tworzenia i oceny modeli obliczeniowych układów konstrukcja budowlana – podłoża górnicze. *Budownictwo*, Zeszyt Naukowy Nr 114, Politechnika Śląska, Gliwice.
- Fedorowicz L. (2006). Zagadnienia kontaktowe budowla – podłoża gruntowe. Część I: Kryteria modelowania i analiz podstawowych zagadnień kontaktowych konstrukcja budowlana – podłoża gruntowe. *Politechnika Śląska*, Zeszyt Naukowy Nr 1729, Gliwice.
- Kawulok M. (2010). Szkody górnicze w budownictwie. *Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej*, Warszawa.
- Kwiatek J. (2007). Obiekty budowlane na terenach górniczych. *Wydawnictwo Głównego Instytutu Górniczego*, Katowice.
- Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych (1997). Praca zbiorowa pod red. J. Kwiatek. *Wydawnictwo Głównego Instytutu Górniczego*, Katowice.
- Starosolski W. (2010). Komputerowe modelowanie betonowych ustrojów inżynierskich, Wybrane zagadnienia, Tom 1 i 2. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.
- Szozda L. (2009). Analiza numeryczna wpływu nieciągłych deformacji podłoża na budynki ścianowe. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.

### CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF THE NUMERICAL MODEL OF THE THEORETICAL BUILDING STRUCTURE

**Abstract:** The article presents the process of building and computational analysis of a multi-storey building model with a wall structure subjected to standard construction loads and mining effects of deformation of the substrate in the form of horizontal deformations of the mining substrate and the curvature of the convex mining area. The building modelling process and its computational analysis were made using the Autodesk Robot Structural Analysis software, which proved to be a useful tool for doing such work. On the basis of computational analysis, the importance of horizontal deformations of the ground substrate has been shown to cause damage to buildings located in mining areas.