



INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

im. Roberta Szewalskiego

POLSKIEJ AKADEMII NAUK

80-231 Gdańsk

ul. J. Fiszera 14

Tel. (centr.): **058 3460881**

Fax: **058 3416144**

e-mail: **imp@imp.gda.pl**

Tel. (sekr.): **058 3416071**

www.imp.gda.pl

Sprawozdanie końcowe z realizacji zadania Nr 3-4.

Tytuł

Zadanie 3: Wykonanie oprogramowania opartego na Metodzie Elementów Spektralnych

Okres realizacji zadania: 04.2010 do 06.2011

Zadanie 4. Wykonanie pre- i postprocesora do oprogramowania do analizy propagacji fal sprężystych w krytycznych elementach konstrukcji

Okres realizacji zadania: 12.2010 do 09.2011

Realizowanego w ramach projektu PROFAL
pt. „System monitorowania stanu technicznego konstrukcji metodą analiz propagacji fal
Lamba”

Numer projektu POIG.01.03.01-22-078/09

Zadanie zrealizowano w całości zgodnie z planem i harmonogramem realizacji. Szczegółowe informacje zawarto w treści niniejszego sprawozdania na stronach 2 do 41

Sprawozdający:

Kierownik zespołu realizatorów zadania

Prof. dr hab. inż. Wiesław Ostachowicz

Odbierający:

Kierownik projektu PROFAL
Prof. dr hab. inż. Wiesław Ostachowicz

.....

Gdańsk 2011



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka



REGON: 000326121

NIP: 584-035-78-82

POLTAX VAT-5UE: PL5840357882

IBAN: PL 42109010980000000009015357

kod SWIFT: WBKPPLPP

Natowski Kod Podmiotu Gospodarki Narodowej NCAGE: 0409H

1. WPROWADZENIE.....	3
2. INSTRUKCJA UŻYTKOWANIA PROGRAMU EWavePro.....	4
3. PRZYKŁAD MOŻLIWOŚCI OBLICZENIOWYCH PROGRAMU	34
4. LITERATURA	41

1. WPROWADZENIE

Niniejsze sprawozdanie zawiera raport z realizacji zadania numer 3 i 4 programu PROFAL. Zadanie 3 polegało na wykonaniu oprogramowania opartego na Metodzie Elementów Spektralnych. Wykonano następujące zadania cząstkowe: opracowanie algorytmu programu komputerowego do analizy propagacji fal sprężystych w krytycznych elementach konstrukcji przeznaczonych do monitorowania, opracowane rodziny subparametrycznych spektralnych elementów skończonych typu powłokowego dla teorii wyższych rzędów, przygotowanie i testowanie programu komputerowego, przeprowadzenie serii symulacji związanych z generacją danych testowych i porównawczych dla potrzeb algorytmów lokalizacji i identyfikacji uszkodzeń w krytycznych elementach konstrukcji przeznaczonych do monitorowania. Zadanie 4 polegało na wykonaniu pre- i postprocesora do oprogramowania do analizy propagacji fal sprężystych w krytycznych elementach konstrukcji

Program EWavePro przeznaczony jest do modelowania i analizy propagacji fal sprężystych w dwu i trójwymiarowych konstrukcjach cienkościennych. Mogą to być konstrukcje wykonane z materiałów izotropowych lub kompozytów laminowanych. Możliwe jest modelowanie i analiza wszystkich możliwych rodzajów fal propagujących w konstrukcjach cienkościennych (ścinających i poprzecznych).

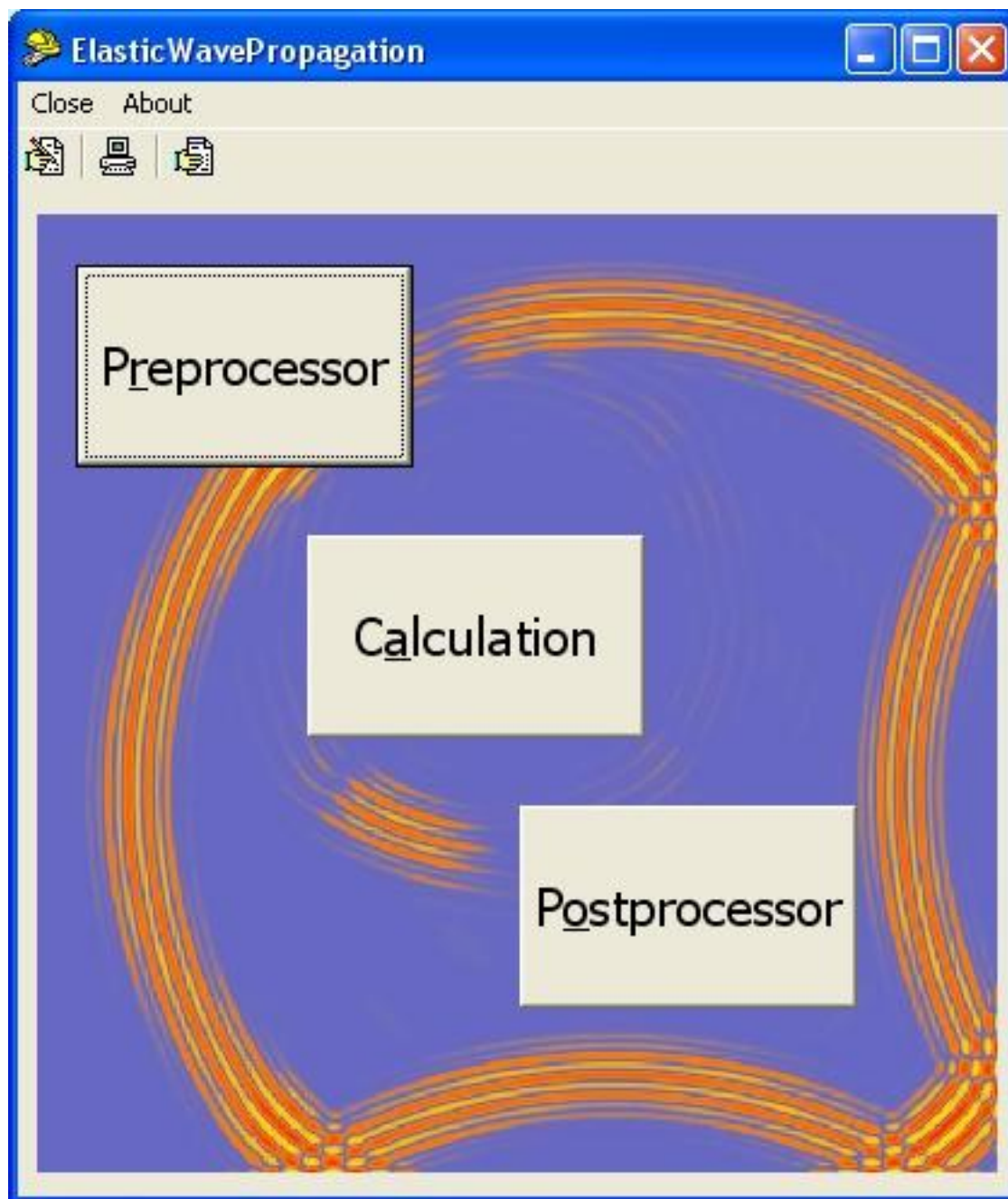
Program EWavePro zbudowano w oparciu o *Metodę Spektralnych Elementów Skończonych (MES)* [1-2]. Elementy spektralne zaimplementowane w programie sformułowano jako trójwymiarowe elementy subparametryczne. Posiadają 36 węzłów, oraz w zależności od rodzaju zagadnienia 2,3 lub 5 stopni swobody w każdym z węzłów. Pola przemieszczeń wykorzystane do budowy elementów są zgodne z teorią *Reissnera-Mindlina* [3]. Program posiada możliwość modelowania elementów piezoelektrycznych pełniących rolę aktuatorów.

Szczegółowy opis modeli zaimplementowanych w programie, oraz ich weryfikację, przedstawiono w raportach okresowych [4-5].

Niniejszy raport zawiera informacje na temat sposobu obsługi programu oraz zawiera przykład jego możliwości obliczeniowych.

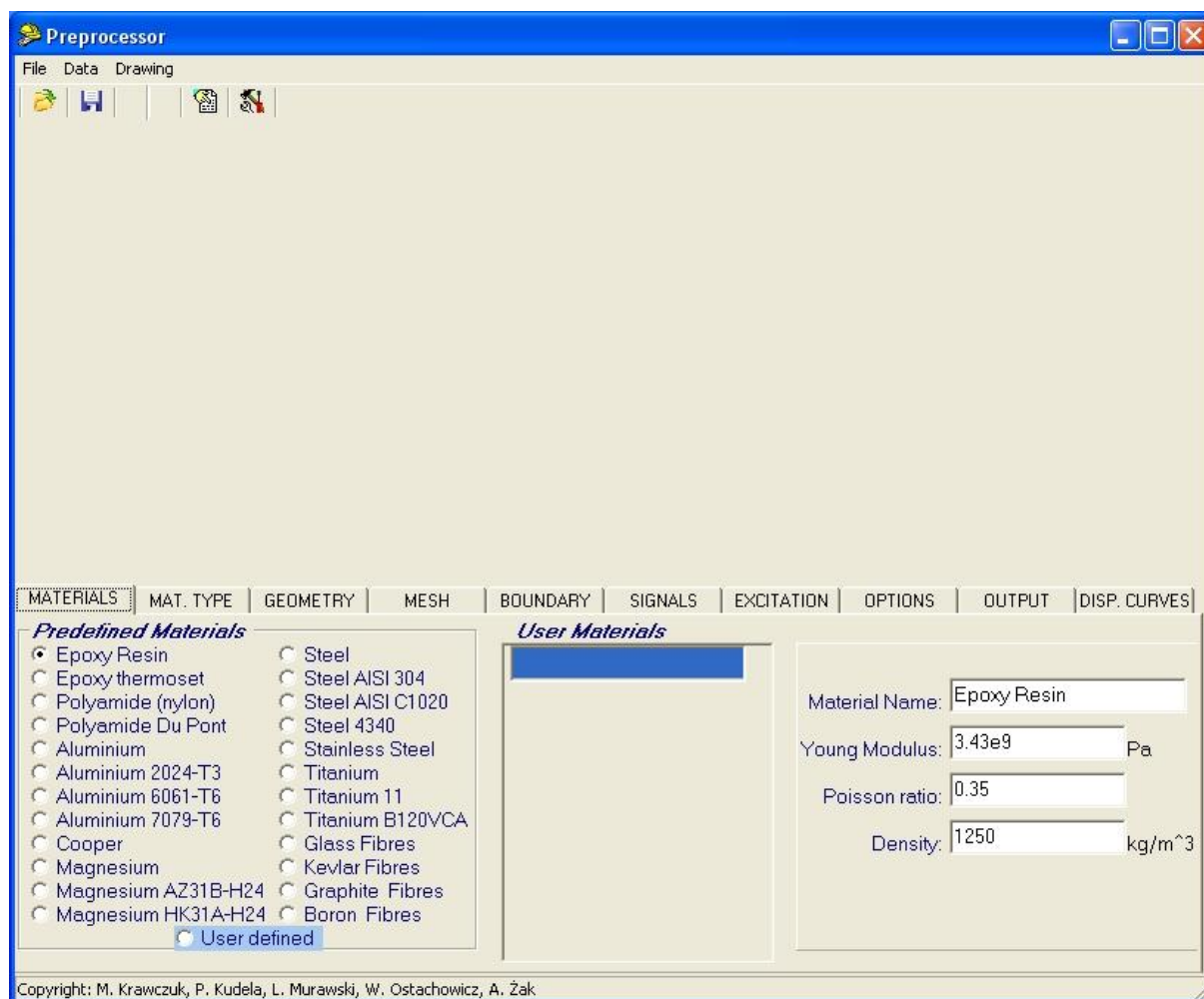
2. INSTRUKCJA UŻYTKOWANIA PROGRAMU EWavePro

W chwili uruchomienia program wyświetlane jest okno główne programu (Rys.1), z trzema zakładkami stanowiącymi odnośniki do oddzielnych podprogramów. **Preprocessor** jest podprogramem w którym tworzony jest model obliczeniowy analizowanego zagadnienia. **Calculation** to program główny w którym rozwiązywane jest analizowane zagadnienie. Natomiast **Postprocessor** jest programem w którym wizualizacja wyników obliczeń.



Rys.1 Okno główne program EWavePro.

W chwili wybrania program **Preprocessor** pojawia się następujące okno dialogowe – Rys.2.



Rys.2 Okno dialogowe program **Preprocessor**.

W górnej listwie znajdują się trzy zakładki **File**, **Data**, **Drawing**.

Zakładka **File** służy do obsługi plików i posiada cztery opcje: **New** – tworzenie nowego pliku danych, **Open** – otwieranie istniejących plików danych, **Save** – zapisywanie bieżącego pliku danych, **Exit** – zakończenie pracy z plikami.

Zakładka **Data** służy do obsługi plików danych i posiada dwie opcje: **Data input** – pozwala wczytać zbiór danych, **Report** -pozwala tworzyć plik zawierający raport z danymi.

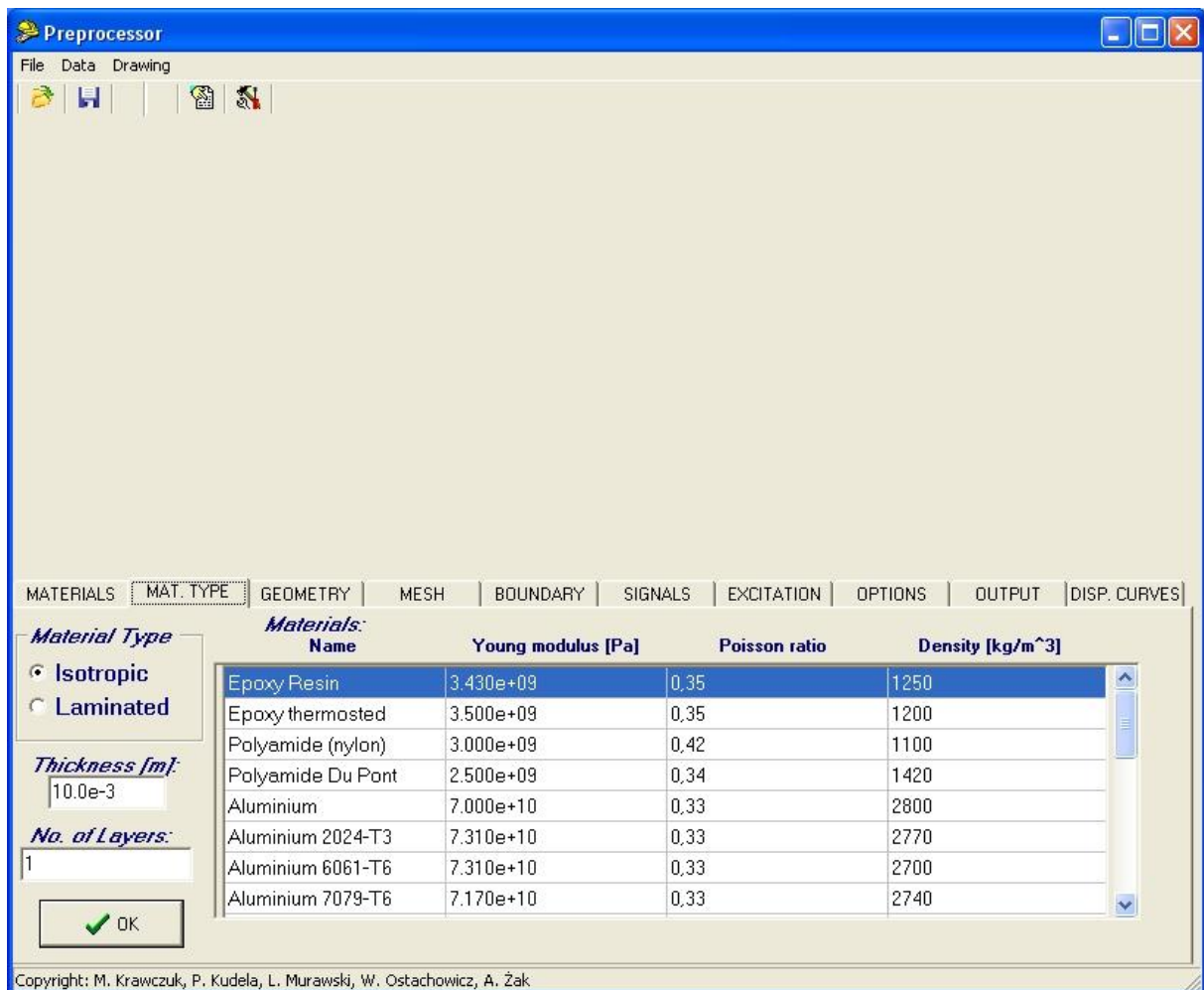
Zakładka **Drawing** służy do rysowania elementów modelu analizowanej konstrukcji. Posiada szereg opcji które pozwalają na następujące czynności: **drawing setting** – pozwala powiększyć fragment modelu, **indicator box** – pozwala sprawdzić współrzędne pojedynczego węzła, oraz numery węzłów w pojedynczym elemencie, **save model** – tworzy ekran i dokonuje zapisu ekranu z modelem do pliku graficznego, **save MES** – tworzy ekran z siatką elementów i zapisuje go do pliku graficznego, **save signal** – tworzy ekran zawierający sygnał wymuszający I zapisuje go do pliku graficznego, **save FFT** – tworzy ekran zawierający FFT

z sygnału wzbudzającego i zapisuje go do pliku graficznego, **save disp. curve** – tworzy ekran zawierający krzywe dyspersji dla danego materiału I zapisuje je do pliku graficznego, **save polar disp.** – tworzy ekran zawierający prędkości fal w układzie biegunowym i zapisuje go do pliku graficznego.

Dolna listwa zawiera 10 zakładek służący do tworzenia modelu analizowanej konstrukcji. Są to zakładki: **MATERIALS** - zawiera bazę danych z własnościami mechanicznymi typowych materiałów inżynierskich, umożliwia ona dodawanie własnych materiałów, **MAT. TYPE** - służy do definiowania materiału z jakiego wykonana jest konstrukcja, użytkownik może wybierać pomiędzy materiałem izotropowym i wielo warstwowym materiałem kompozytowym., **GEOMETRY** – służy do tworzenia modelu geometrycznego konstrukcji, **MESH C**- służy do generowania siatki spektralnych elementów skończonych modelu dyskretnego, **BOUNDARY** - służy do zadawania warunków brzegowych analizowanej konstrukcji, **SIGNALS** – służy do tworzenia modelu sygnału wymuszającego reprezentującego falę sprężystą propagującą w konstrukcji, **EXCITATION** - służy do definiowania sposobów i miejsc wzbudzania fal sprężystych propagujących w konstrukcji, **OPTIONS** - umożliwia użytkownikowi definiowanie schematu całkowania oraz modelu tłumienia, **OUTPUT** - służy do tworzenia liku dla postprocesora programu, **DISP. CURVES** - służy do rysowania krzywych dyspersji dla przyjętego modelu materiału konstrukcji.

Każda z omawianych zakładek posiada szereg opcji umożliwiających wygodne i efektywne tworzenie modelu dyskretnego analizowanej konstrukcji. Opcje te zostaną omówione szczegółowo na przykładzie tworzenia modelu dyskretnego izotropowej płyty w kształcie litery Z.

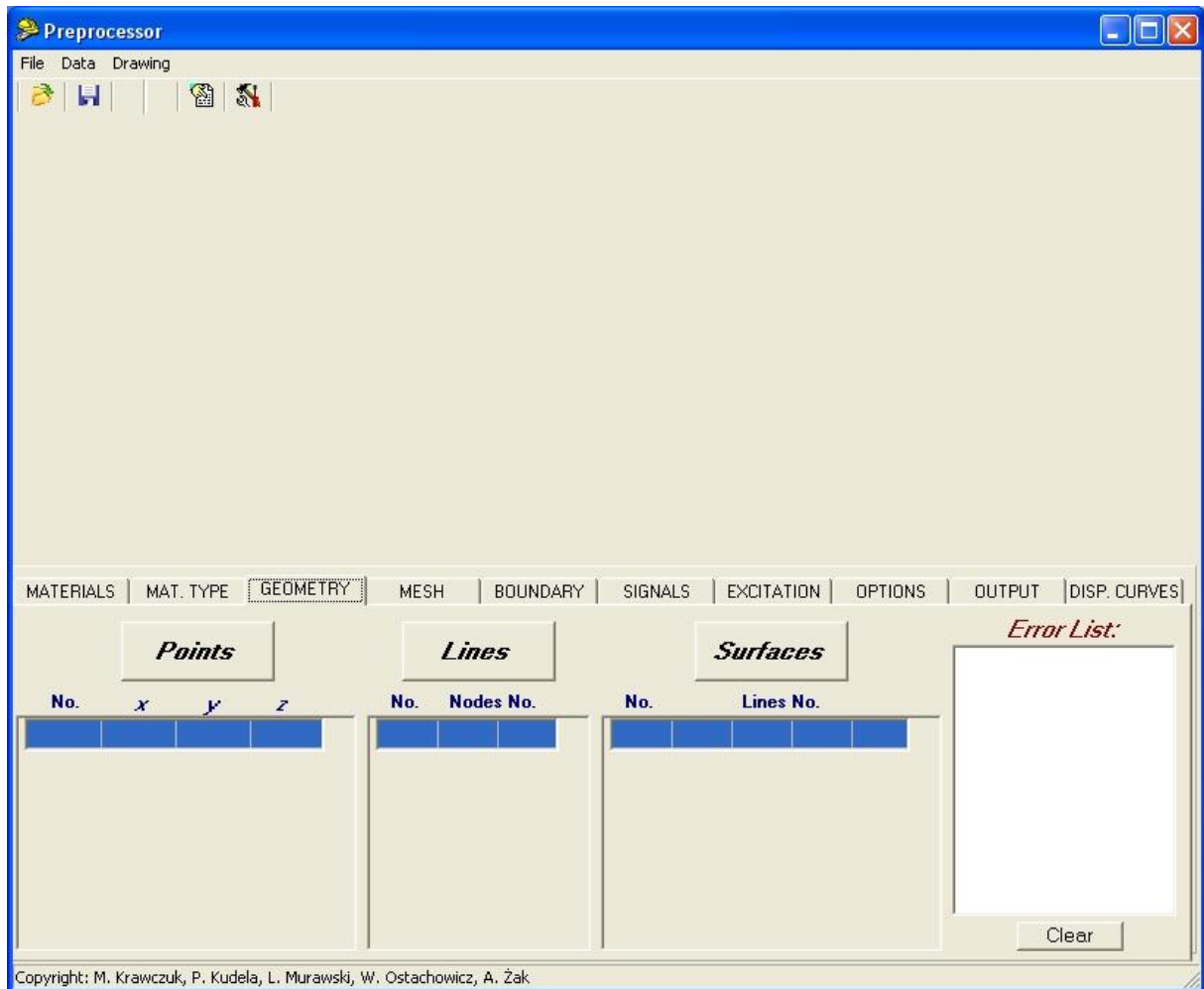
Proces tworzenia modelu rozpoczynamy od wyboru materiału i grubości płyty, co realizowane jest w zakładce **MAT. TYPE – RYS.3**.



Rys.3 Okno programu z aktywną zakładką **MAT. TYPE**.

Po wybraniu okna **MAT.TYPE** użytkownik ma możliwość wyboru następujących opcji: **Material Type** - użytkownik definiuje rodzaj struktury, mając do wyboru struktury izotropowe lub kompozytowe, **Thickness** – użytkownik podaje grubość pojedynczej warstwy (materiał kompozytowy) lub całkowitą grubość (materiał izotropowy), **No. of Layers** – w przypadku wyboru kompozytu, użytkownik podaje liczbę warstw materiału kompozytowego, **Materials** – użytkownik może wybrać rodzaj materiału struktury lub pojedynczej warstwy z listy materiałów zdefiniowanych w zakładce **MATERIALS**.

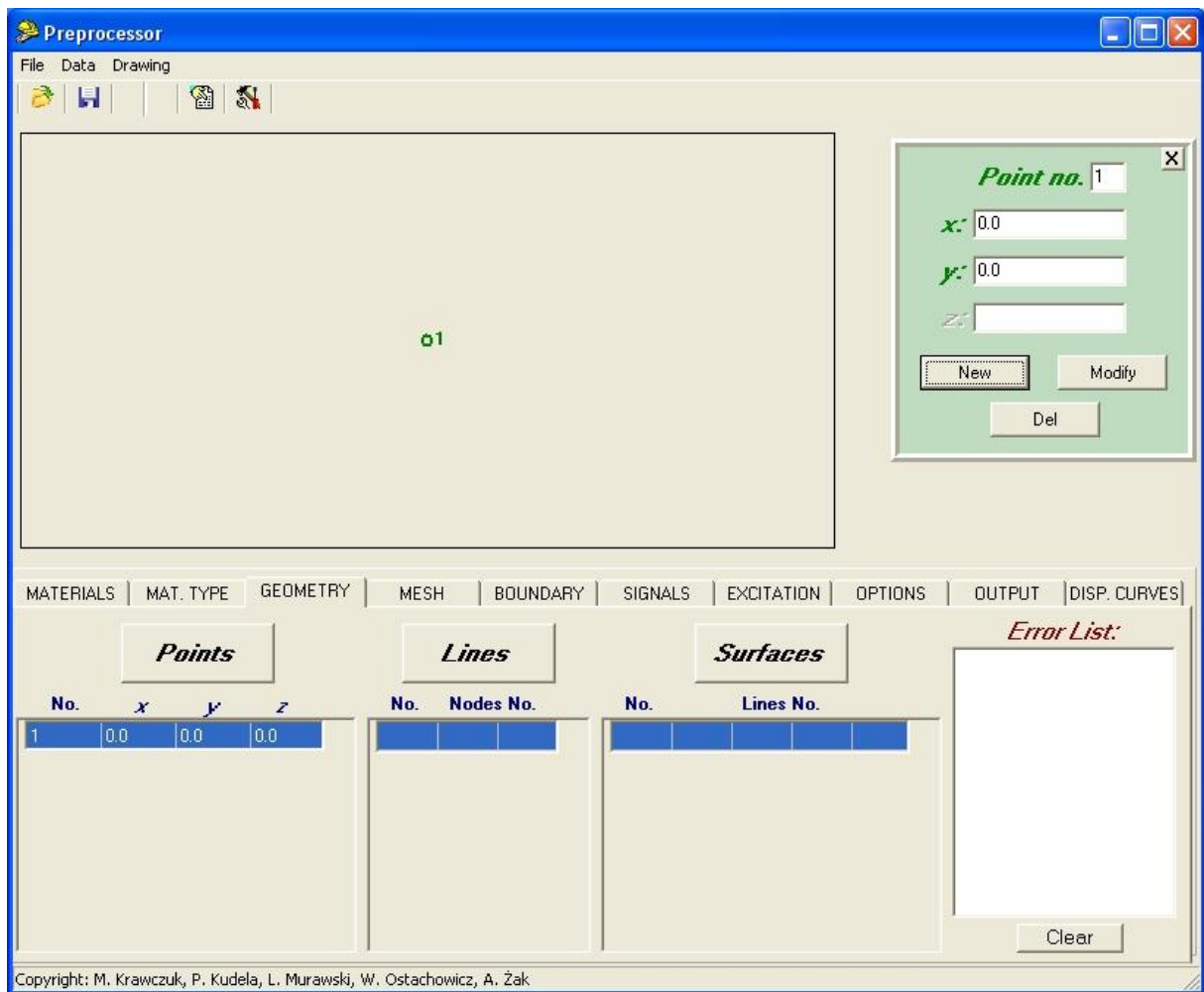
Kolejnym krokiem tworzenia modelu jest stworzenie modelu geometrycznego analizowanej konstrukcji. Realizowane jest to zakładce **GEOMETRY** (Rys.4-10).



Rys.4 Okno zakładki **GEOMETRY**.

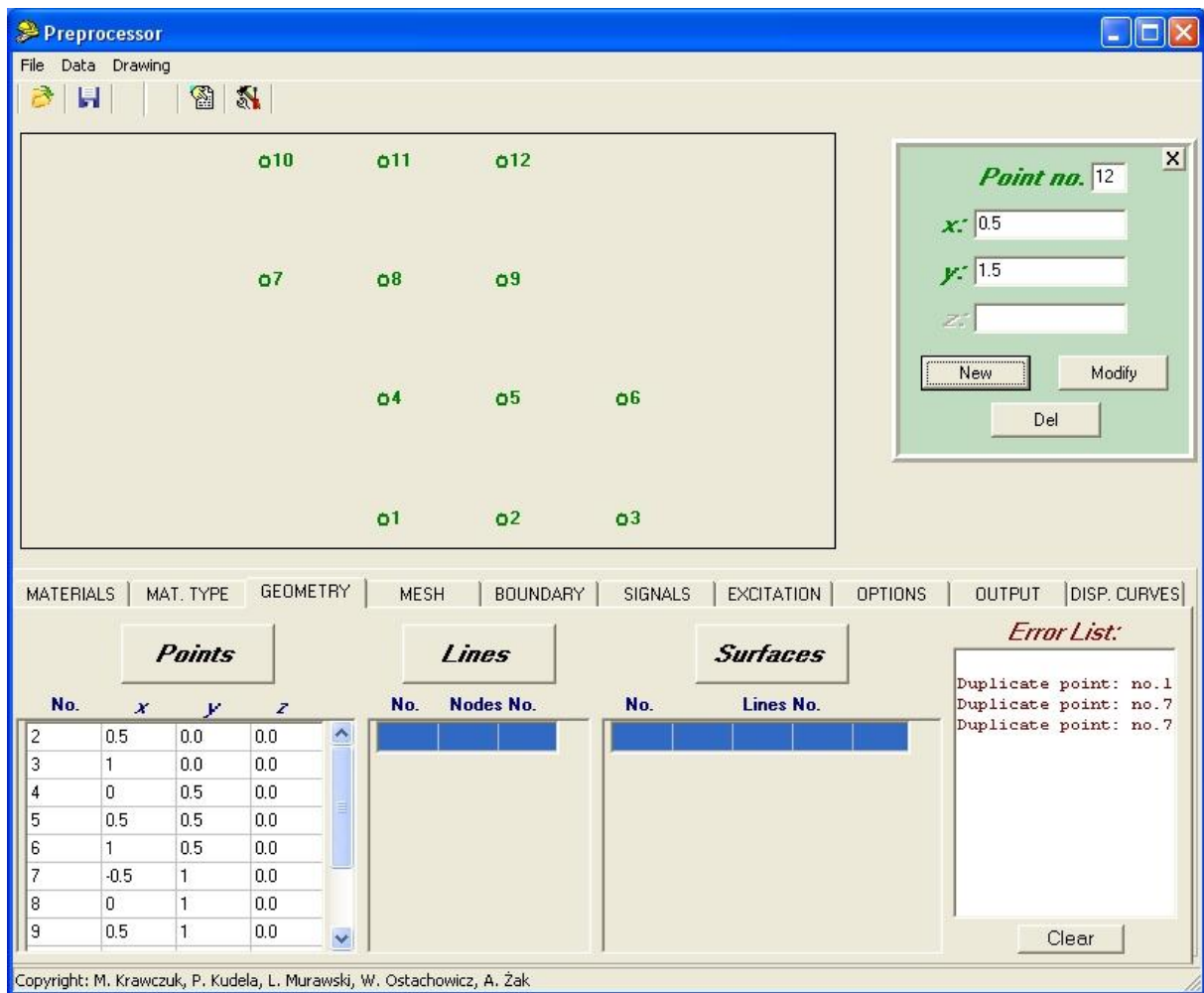
Po wybraniu zakładki **GEOMETRY** użytkownik ma możliwość tworzenia modelu geometrycznego analizowanej konstrukcji wykorzystując obiekty typu punkt, linia i powierzchnia. Zakładka **Points** - umożliwia wprowadzenie współrzędnych punktów modelu, zakładka **Lines** - służy do tworzenia linii modelu w oparciu o wcześniej zdefiniowane punkty, natomiast zakładka **Surfaces** - pozwala tworzyć powierzchnie w oparciu o wcześniej zdefiniowane linie.

Rys.5 ilustruje sposób zadawania współrzędnych punktu, podczas gdy Rys.6 ilustruje punkty potrzebne do stworzenia modelu analizowanej płyty typu Z.



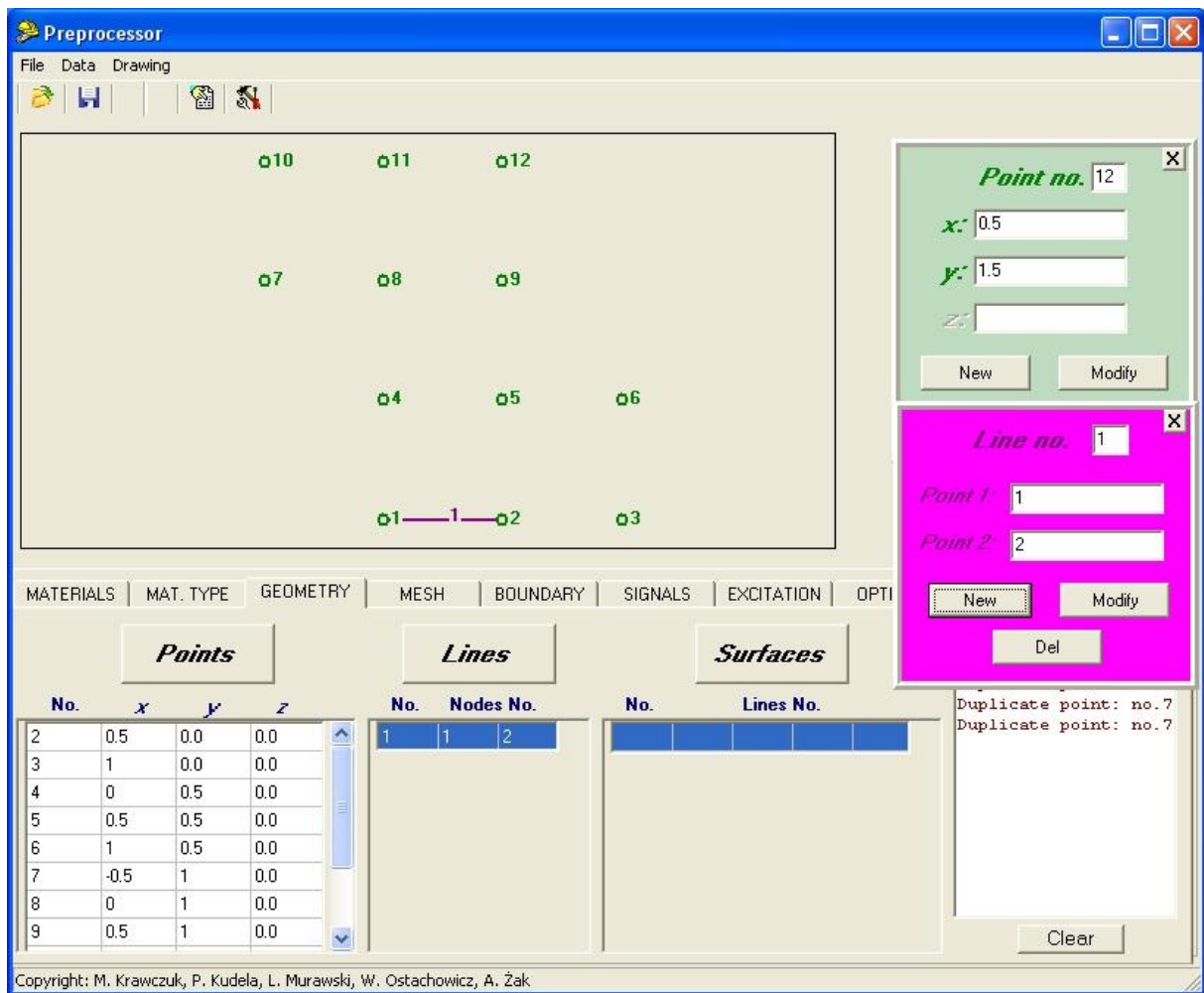
Rys.5 Okno programu z aktywną zakładką **GEOMETRY** i **POINTS**.

Użytkownik wprowadza współrzędne punktu 1 w oknie **Point No.**, w celu wizualizacji naciska przycisk **New**. Istnieje możliwość zmiany współrzędnych punktu za pomocą przycisku **Modify** lub jego usunięcia – przycisk **Del**.



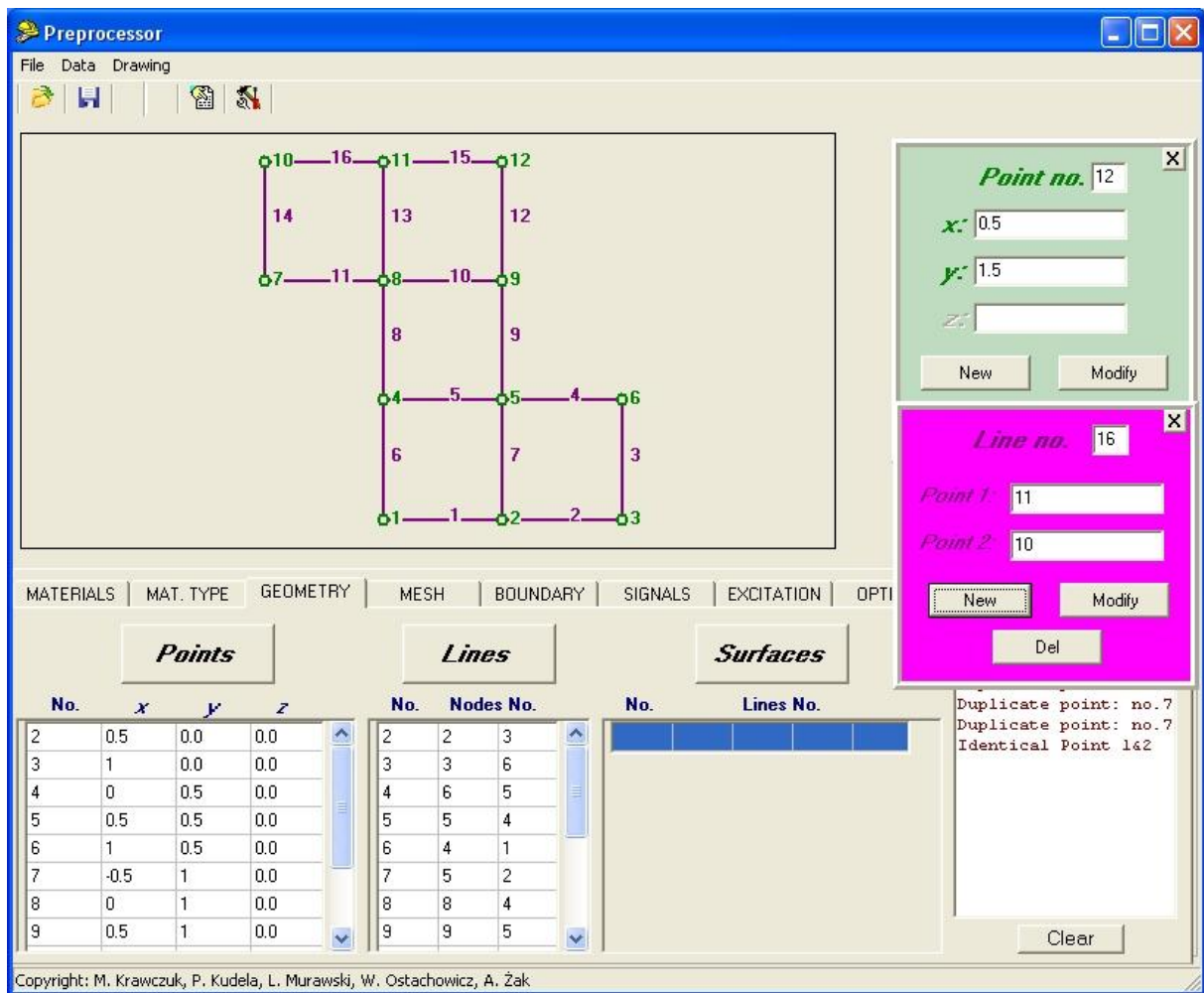
Rys.6 Wizualizacja punktów modelu płyty Z - lista ich współrzędnych

Na Rys.7-8 przedstawiono sposób tworzenia linii modelu geometrycznego analizowanej płyty. Linie tworzone SA w oparciu o wcześniej zdefiniowane punkty charakterystyczne.



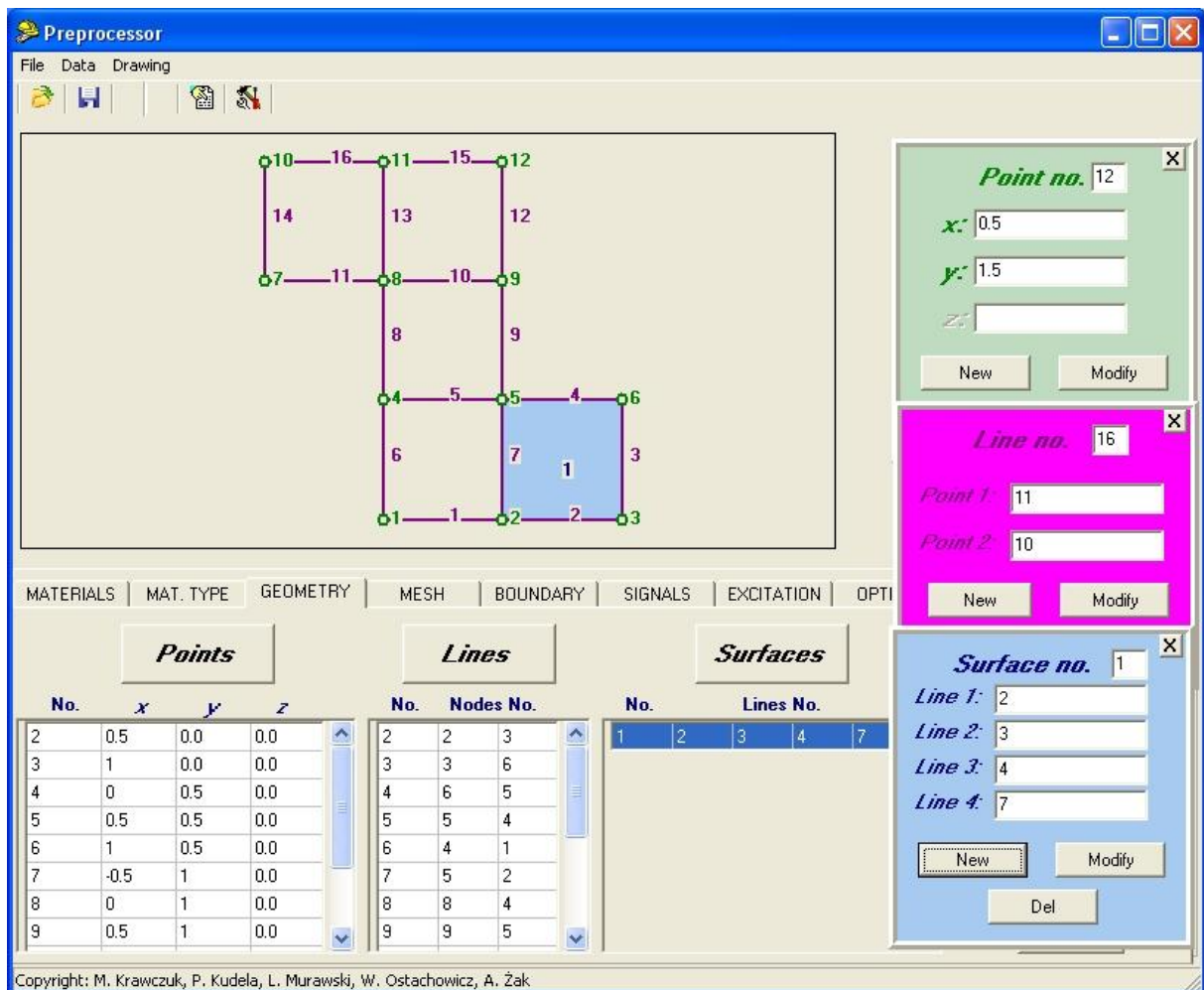
Rys.7 Okno programu z aktywną zakładką **GEOMETRY** i **LINES**.

Użytkownik wprowadza początek i koniec linii poprzez wybór odpowiednich punktów w oknie **Line No.**, w celu wizualizacji naciska przycisk **New**. Istnieje możliwość zmiany punktów definiujących linię za pomocą przycisku **Modify** lub jej usunięcia – przycisk **Del**.



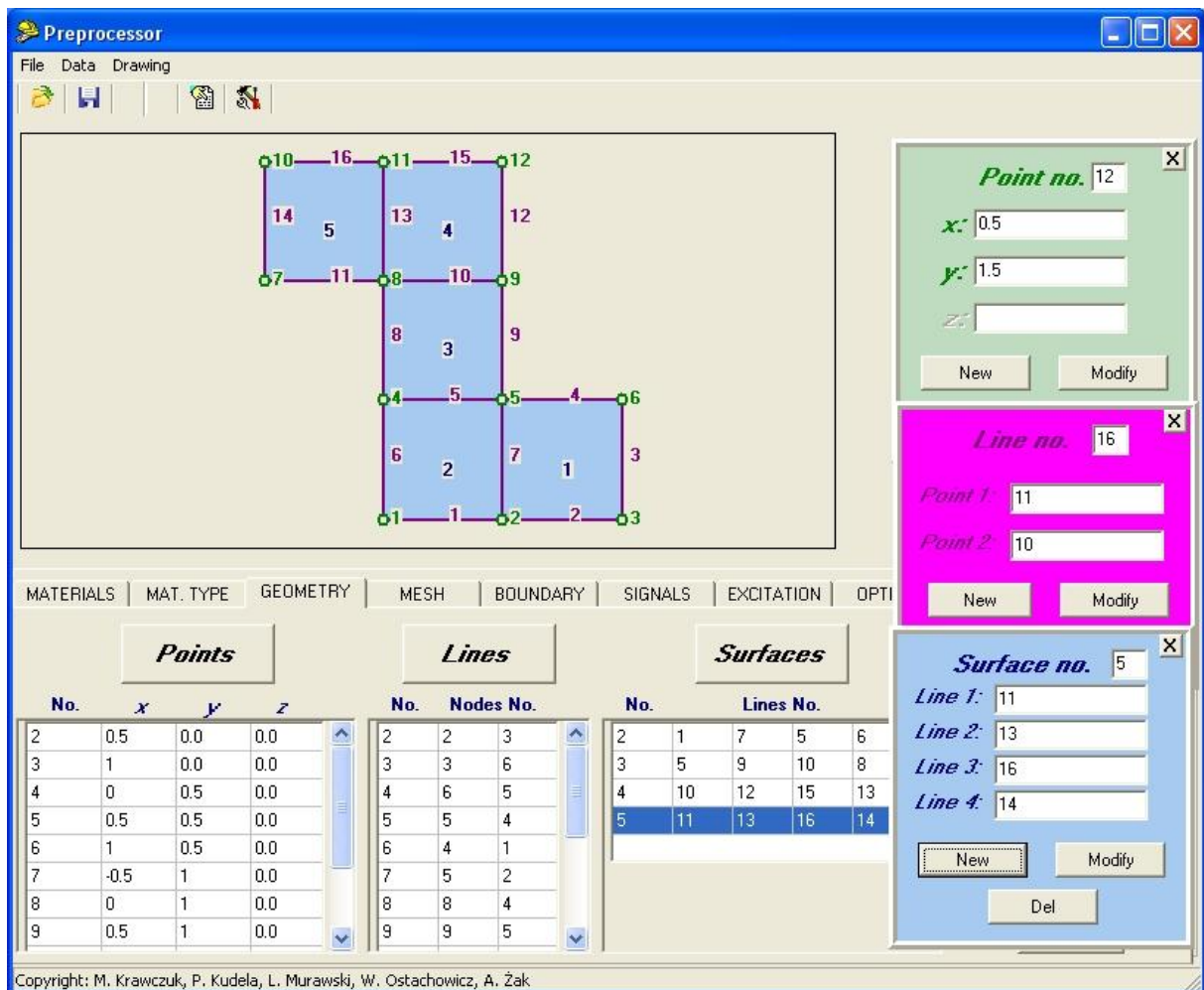
Rys.8 Wizualizacja linii i punktów modelu płyty Z - lista linii i współrzędnych punktów.

Na Rys.9-10 przedstawiono sposób tworzenia powierzchni modelu geometrycznego analizowanej płyty. Powierzchnie tworzone SA w oparciu o wcześniej zdefiniowane linie.



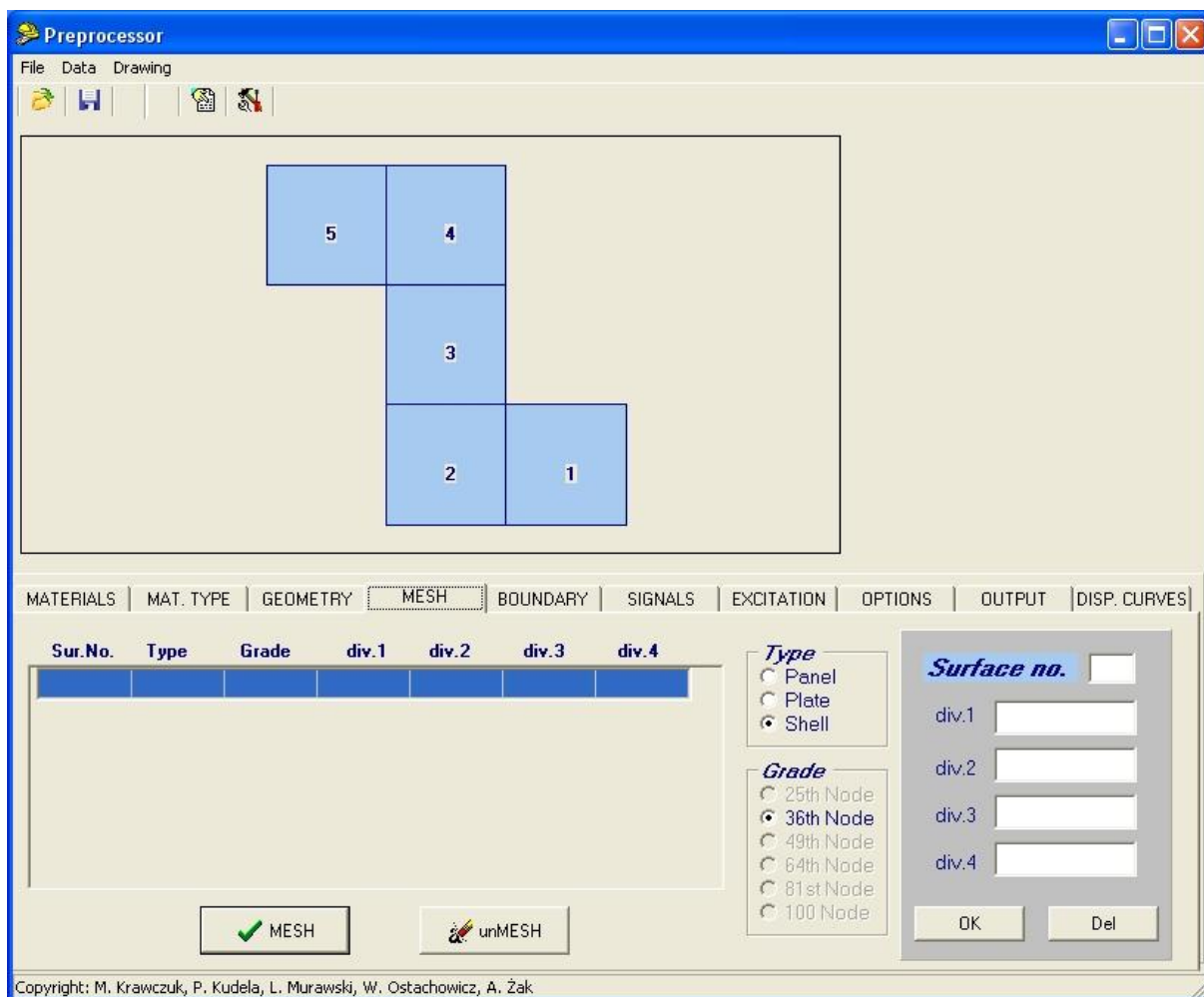
Rys.9 Okno programu z aktywną zakładką **GEOMETRY** i **SURFACES**.

Użytkownik definiuje powierzchnie poprzez podanie numerów linii tworzących krawędzie powierzchni w oknie **Surface No.**, w celu wizualizacji naciska przycisk **New**. Istnieje możliwość zmiany linii definiujących powierzchnię za pomocą przycisku **Modify** lub jej usunięcia – przycisk **Del**.



Rys.10 Wizualizacja powierzchni, linii i punktów modelu płyty Z - lista powierzchni, linii i współrzędnych punktów.

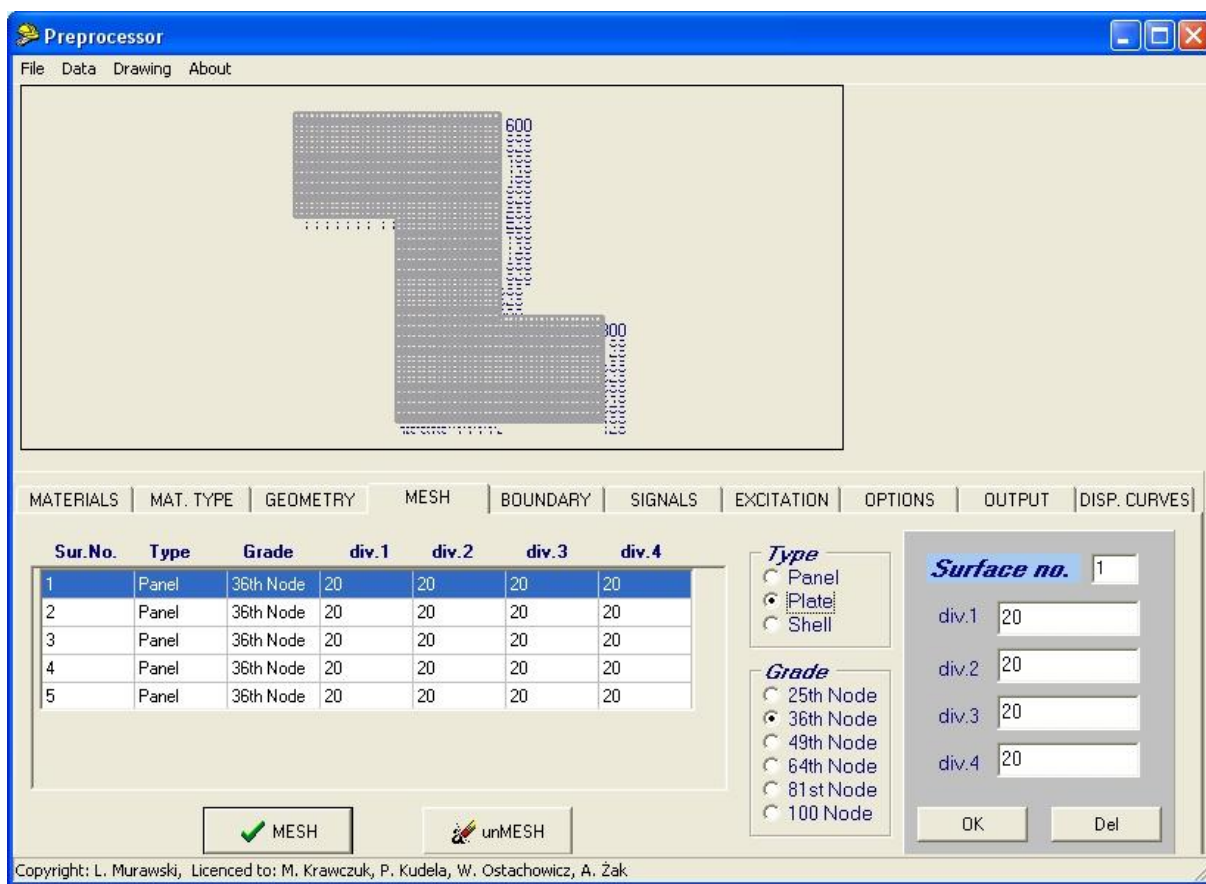
Kolejnym krokiem na drodze stworzenia modelu dyskretnego analizowanej płyty, jest stworzenie siatki spektralnych elementów skończonych. Proces ten jest realizowany w zakładce **MESH** – Rys.11-13.



Rys.11 Okno programu z aktywną zakładką **MESH**.

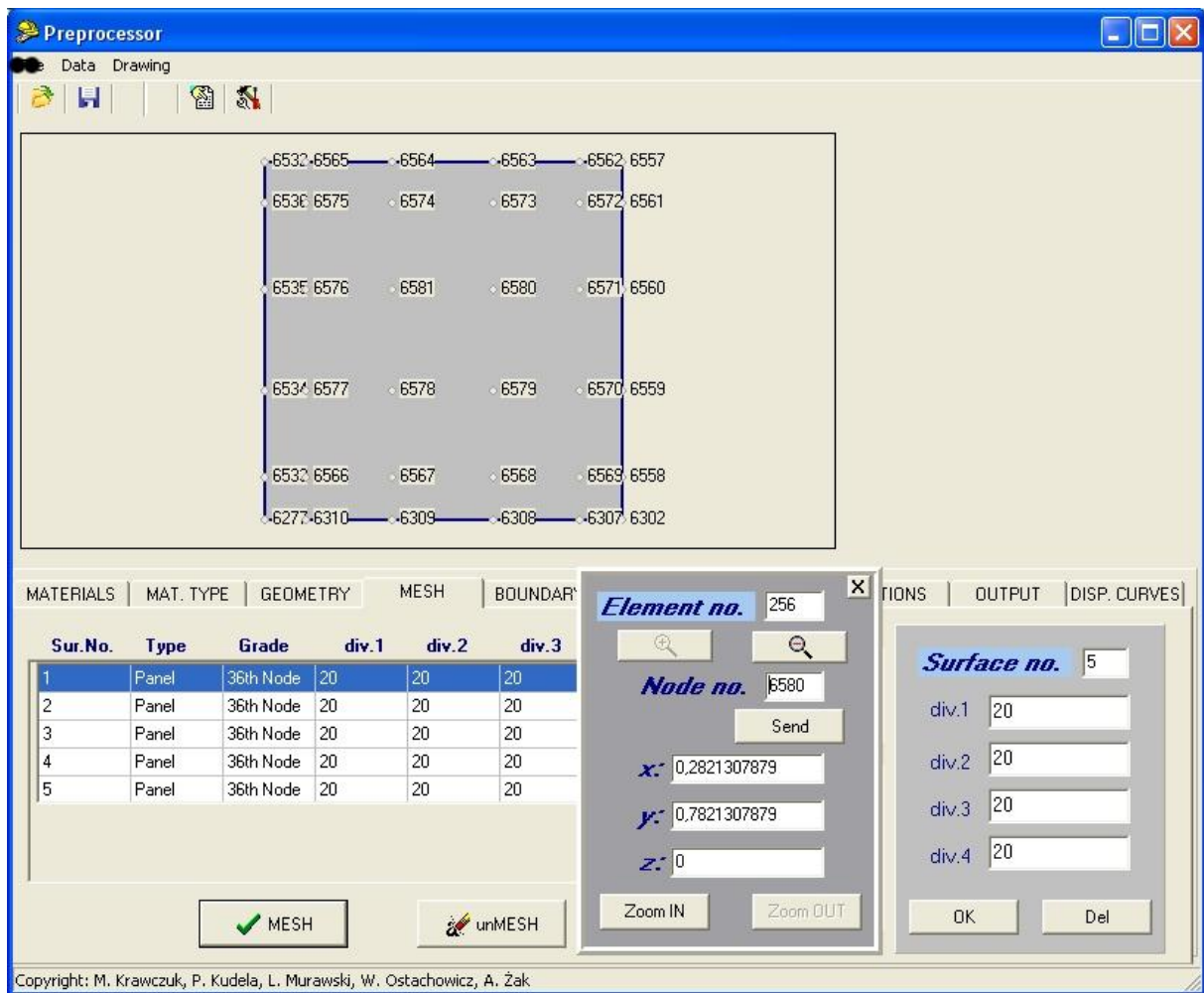
Tworząc siatkę spektralnych elementów skończonych użytkownik ma możliwość wyboru rodzaju struktury poprzez zakładkę **Type** – możliwe są struktury typu membrana (panel), płyta (plate) oraz powierzchnia (shell). Kolejna opcja zawarta w zakładce **Grade** umożliwia wybór typu elementu spektralnego (w obecnej wersji programu stosowane są elementy 36 węzłowe). W oknie **Surface** możliwe jest definiowanie gęstości siatki elementów spektralnych. Realizowane jest to poprzez wybór liczby elementów na krawędziach każdej z powierzchni (przyciski div.1-div.4). Zatwierdzenie przyjętego podziału odbywa się przyciskiem OK., usuwanie przyjętego podziału realizuje przycisk Del.

Przycisk **MESH** służy do wizualizacji siatki spektralnych elementów skończonych w oknie program. Możliwe jest usuwanie przyjętej siatki za pomocą przycisku **unMESH**.



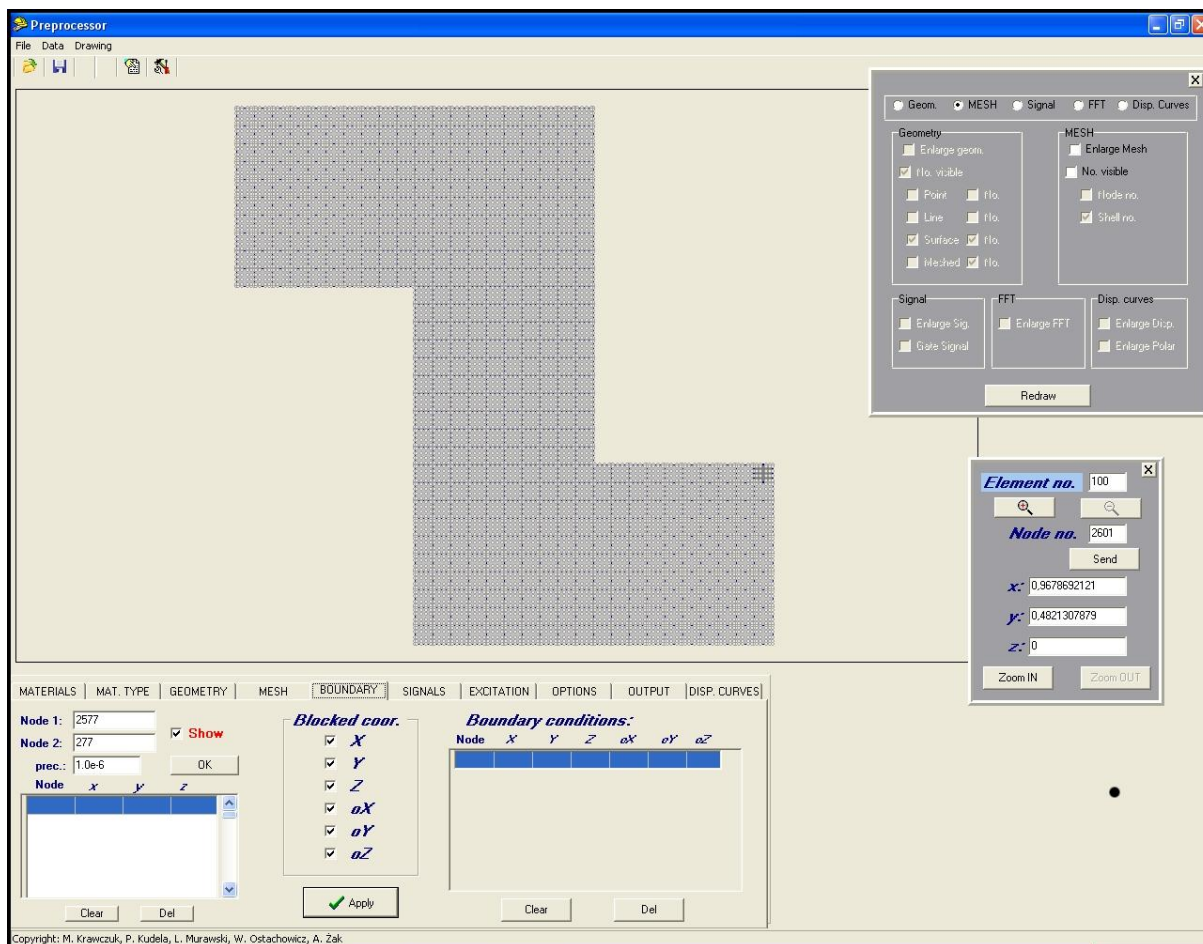
Rys.12 Okno programu z aktywną zakładką **MESH** i wygenerowaną siatką elementów spektralnych. Widoczna jest lista powierzchni, jej rodzaj, oraz przyjęte podziały krawędzi każdej z powierzchni.

W celu powiększenia wybranych fragmentów modelu dyskretnego wykorzystywana jest zakładka **Drawing / Drawing setting** opisana uprzednio. Na Rys.13 przedstawiono widok okna z wybranym elementem spektralnym i jego numeracją.



Rys.13 Okno programu z wybranym elementem spektralnym i jego numeracją

Kolejnym krokiem w tworzeniu modelu jest zadanie warunków brzegowych. Realizowane jest to w zakładce **BOUNDARY** – Rys.14-16.



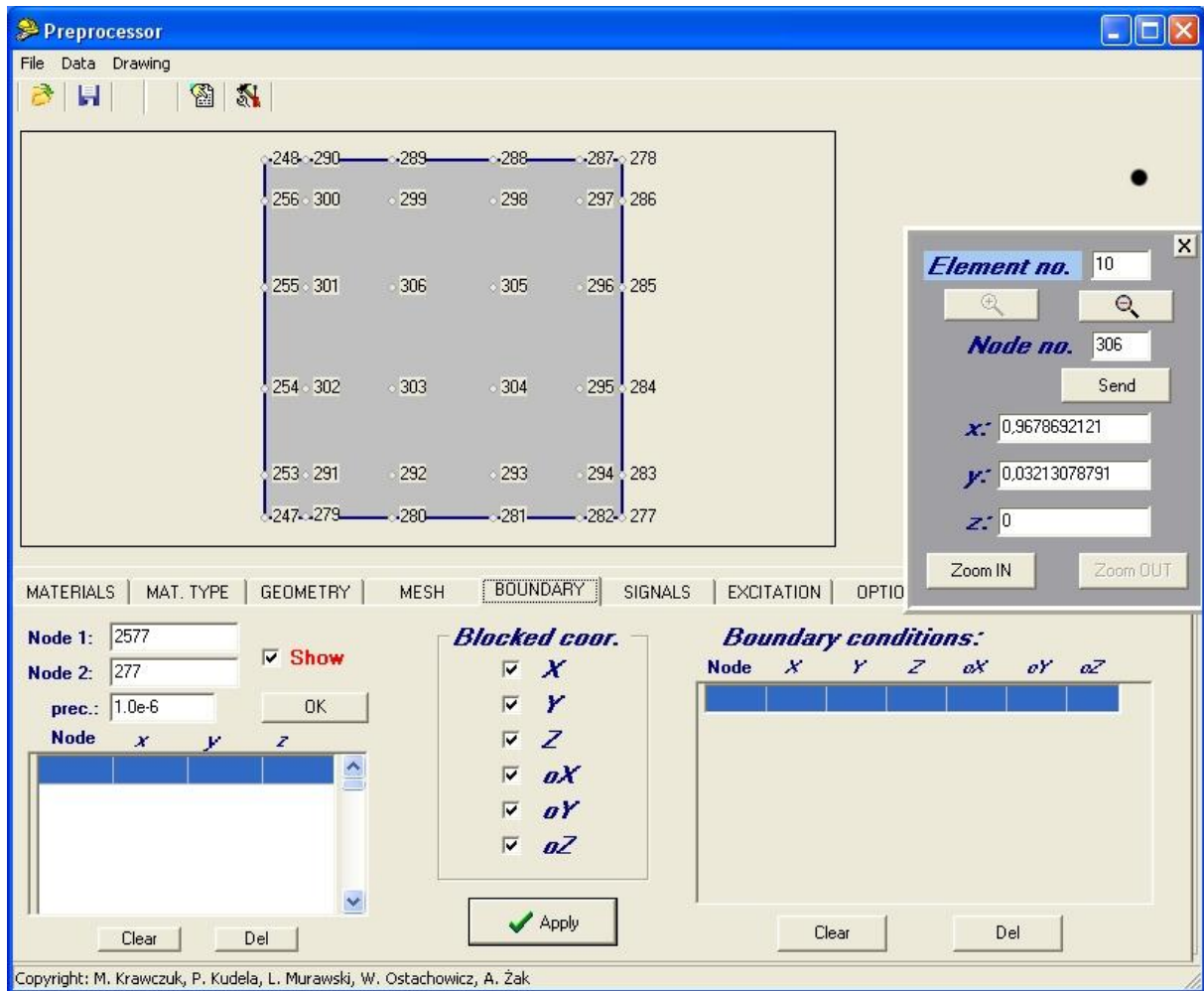
Rys.14 Okno programu z aktywną zakładką **BOUNDARY**.

Użytkownik może zadawać geometryczne warunki brzegowe w określonych węzłach modelu dyskretnego. Rodzaj warunków brzegowych definiowany jest w zakładce **Blocked coord.** Użytkownik może zablokować wszystkie stopnie swobody, lub jedynie wybrane przy czym (**X** oznacza przemieszczenia w kierunku osi x, **Y** oznacza przemieszczenia w kierunku osi y, **Z** oznacza przemieszczenia w kierunku osi z, **aX** oznacza kąt obrotu wokół osi x, **aY** oznacza kąt obrotu wokół osi y, **aZ** oznacza kąt obrotu wokół osi z). List węzłów wraz z zadanymi warunkami brzegowymi wyświetlana jest w oknie **Boundary conditions**.

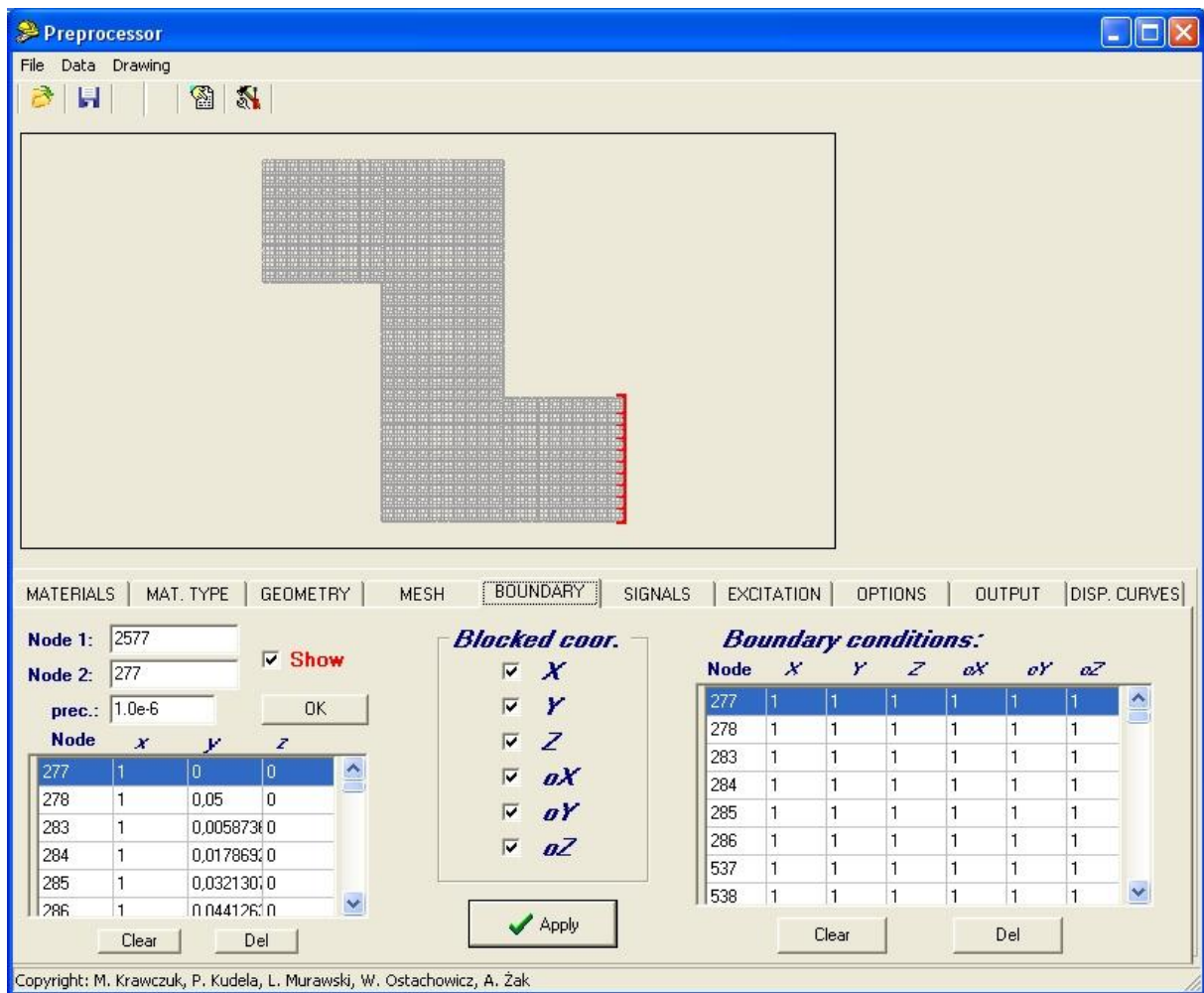
Uwaga 1: W przypadku wyboru dwóch węzłów (**Node 1**, **Node 2**) program automatycznie przypisuje wybrany warunek brzegowy do wszystkich węzłów leżących na odcinku łączącym wybrane węzły.

Uwaga 2: Zakładka **Drawing** pozwala powiększyć wybrany fragment w celu znalezienia węzłów potrzebnych do zdefiniowania warunków brzegowych – Rys.15.

Wizualizację warunków brzegowych przyjętych w analizowanym przykładzie przedstawia Rys.16.



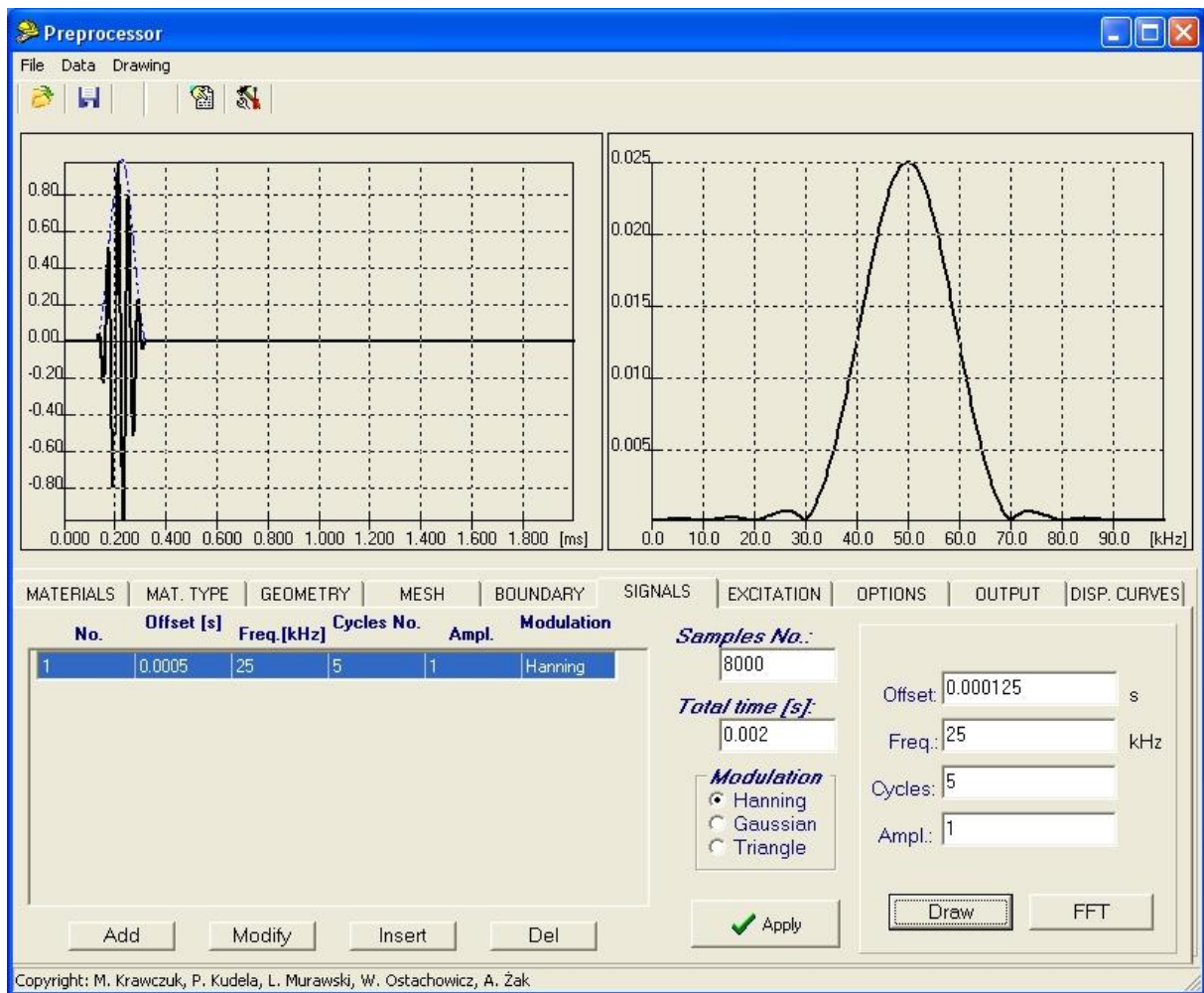
Rys.15 Okno programu z aktywną zakładką **BOUNDARY** i **Drawing options**.



Rys.16 Okno programu z aktywną zakładką **BOUNDARY** - na czerwono zaznaczono miejsca przyłożenia warunków brzegowych.

Lista węzłów wraz z warunkami brzegowymi znajduje się w oknie **Boundary conditions**. Możliwym jest odrzucanie określonych węzłów przyciskiem **Del**, lub wszystkich węzłów przyciskiem **Clear**.

Kolejnym etapem tworzenia modelu analizowanej konstrukcji jest zdefiniowanie wymuszeń działających na płytę. Jest to realizowane w zakładce **SIGNALS** – Rys.17.



Rys.17 Okno programu z aktywną zakładką **SIGNALS**.

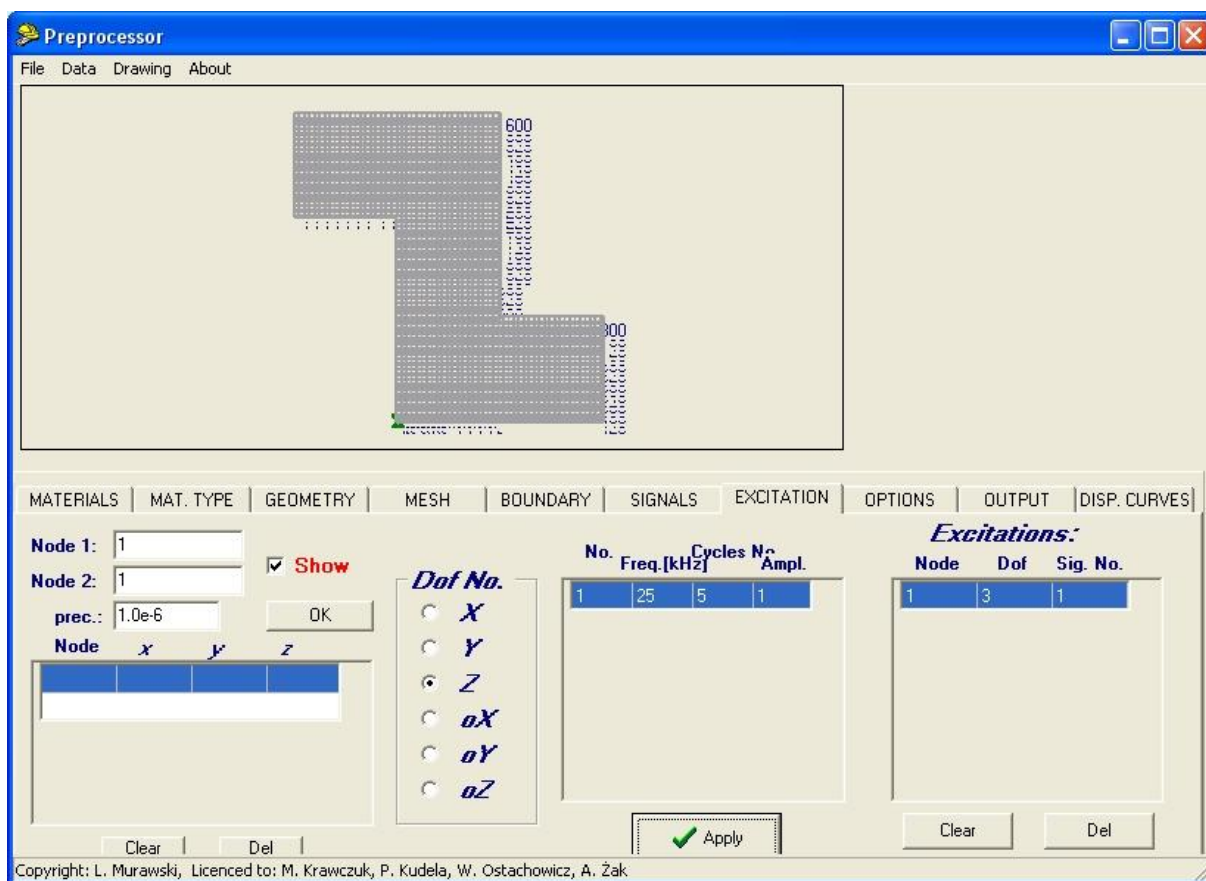
Użytkownik definiuje sygnały (w postaci paczek falowych) poprzez podanie ich parametrów w oknie dialogowym. Okno **Samples No.** służy do zdefiniowania liczby kroków czasowych na jakie podzielony zostanie sygnał (jest to jednocześnie liczba kroków całkowania zadania). Okno **Total time** służy do definiowania czasu trwania sygnału. W oknie **Modulation** użytkownik może wybrać sposób modulacji sygnału (okno Hanninga, Gaussa lub trójkątne).

Parametry sygnału nośnego podawane są w kolejnych oknach. Okno **Offset** służy do podania czasu w którym pojawia się wymuszenie w postaci paczki falowej. Okno **Freq.** służy do zdefiniowania częstotliwości sygnału nośnego w kHz. Okno **Cycles** służy do zdefiniowania liczby cykli sygnału nośnego. Okno **Ampl.** wykorzystywane jest do definiowania amplitudy sygnału nośnego.

Przycisk **Draw** służy do rysowania zadanego sygnału, a przycisk **FFT** umożliwia wykonanie szybkiej transformaty Fouriera zadanego sygnału.

Użytkownik może definiować tyle sygnałów ile potrzebnych jest w modelu. Rozpoczęcie tworzenia nowego sygnału odbywa się za pomocą przycisku **Insert**. Możliwe jest modyfikowanie uprzednio stworzonych sygnałów za pomocą przycisku **Modify**. Przycisk **Del** umożliwia usuwanie wybranego sygnału z listy. Przycisk **Add** służy do zapisania stworzonego sygnału.

Po zdefiniowaniu sygnałów wymuszających należy określić sposób ich oddziaływania na analizowaną konstrukcję. Realizowane jest to w zakładce **EXCITATION** – Rys.18-19.

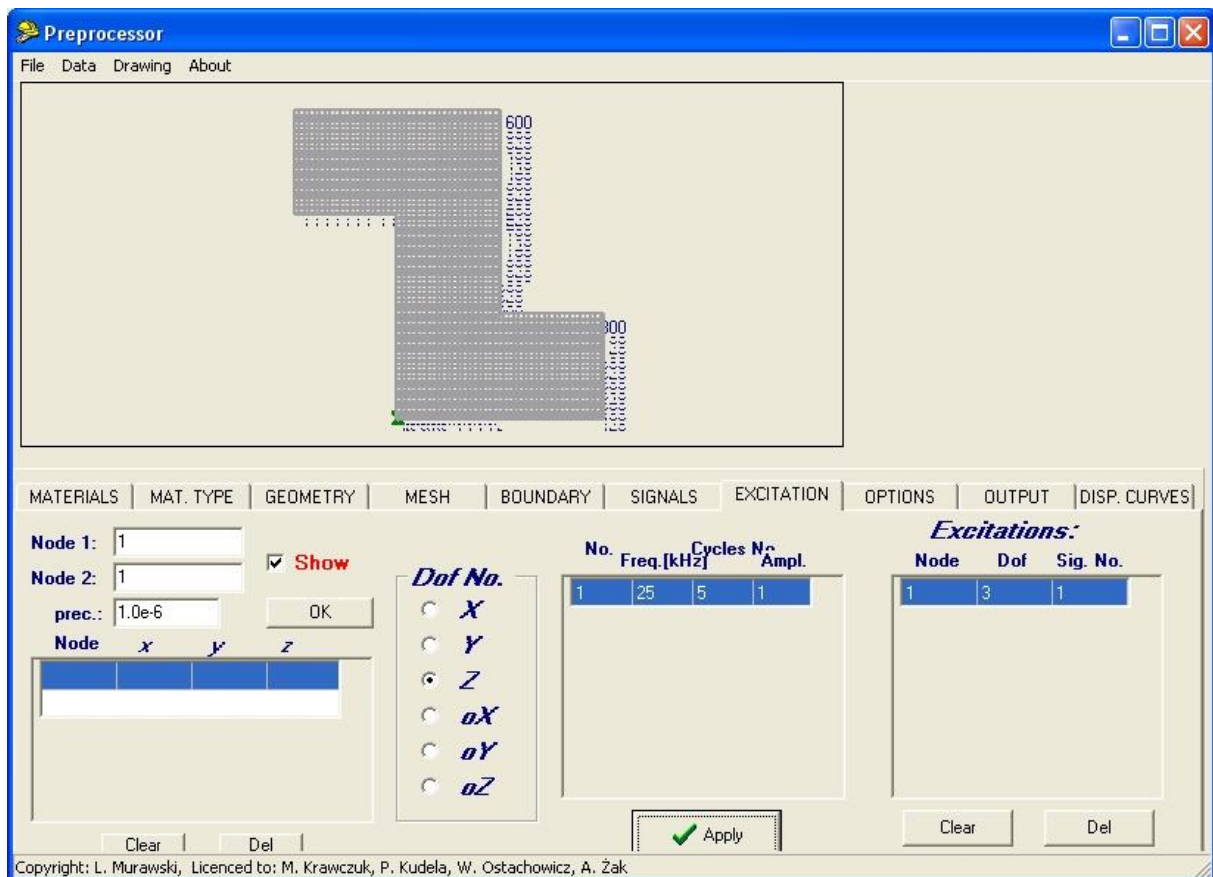


Rys.18 Okno programu z aktywną zakładką **EXCITATION**.

Użytkownik może zdefiniować węzeł do których przyłożony jest dany sygnał – **Node 1**. Lista dostępnych sygnałów wyświetlana jest w środkowym oknie. Kierunek działania sygnału definiowany jest w oknie **Dof No.** - (**X** oznacza przemieszczenia w kierunku osi x, **Y** oznacza przemieszczenia w kierunku osi y, **Z** oznacza przemieszczenia w kierunku osi z, **aX** oznacza kąt obrotu wokół osi x, **aY** oznacza kąt obrotu wokół osi y, **aZ** oznacza kąt obrotu wokół osi

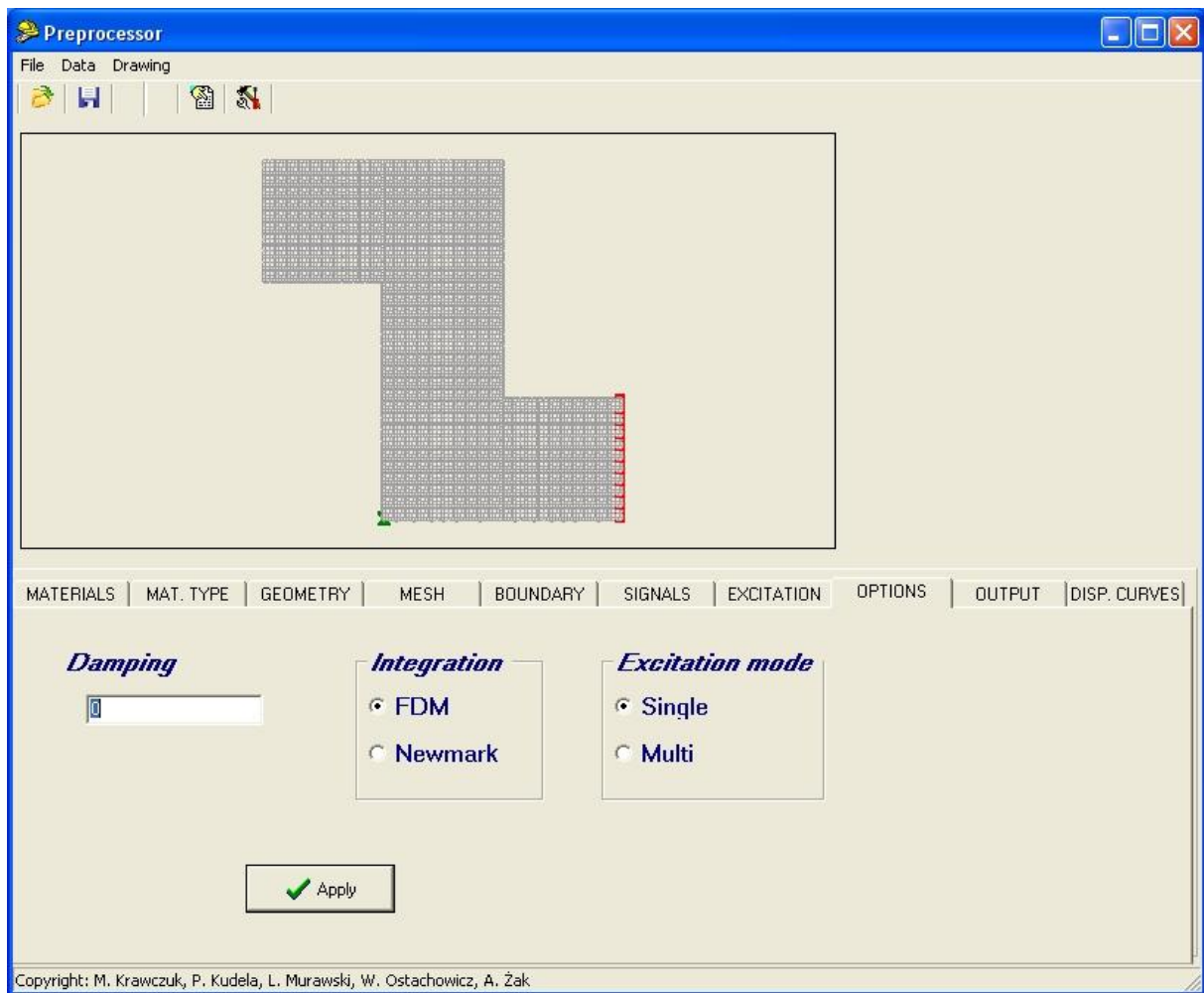
z). W oknie **Excitations** wyświetlają się kolejne zdefiniowane wymuszenia i ich parametry (węzeł, kierunek i rodzaj sygnału)

Uwaga 1: W przypadku wyboru dwóch węzłów (**Node 1**, **Node 2**) program automatycznie przypisuje wybrany sygnał do wszystkich węzłów leżących na odcinku łączącym wybrane węzły.



Rys.19 Okno programu z aktywną zakładką **EXCITATION** – na zielono zaznaczono miejsce przyłożenia wymuszenia.

Użytkownik wykorzystując okno **OPTIONS** – Rys.20 może zdefiniować parametry dotyczące tłumienia stosowanego w modelu, oraz wybrać sposób całkowania równań ruchu.

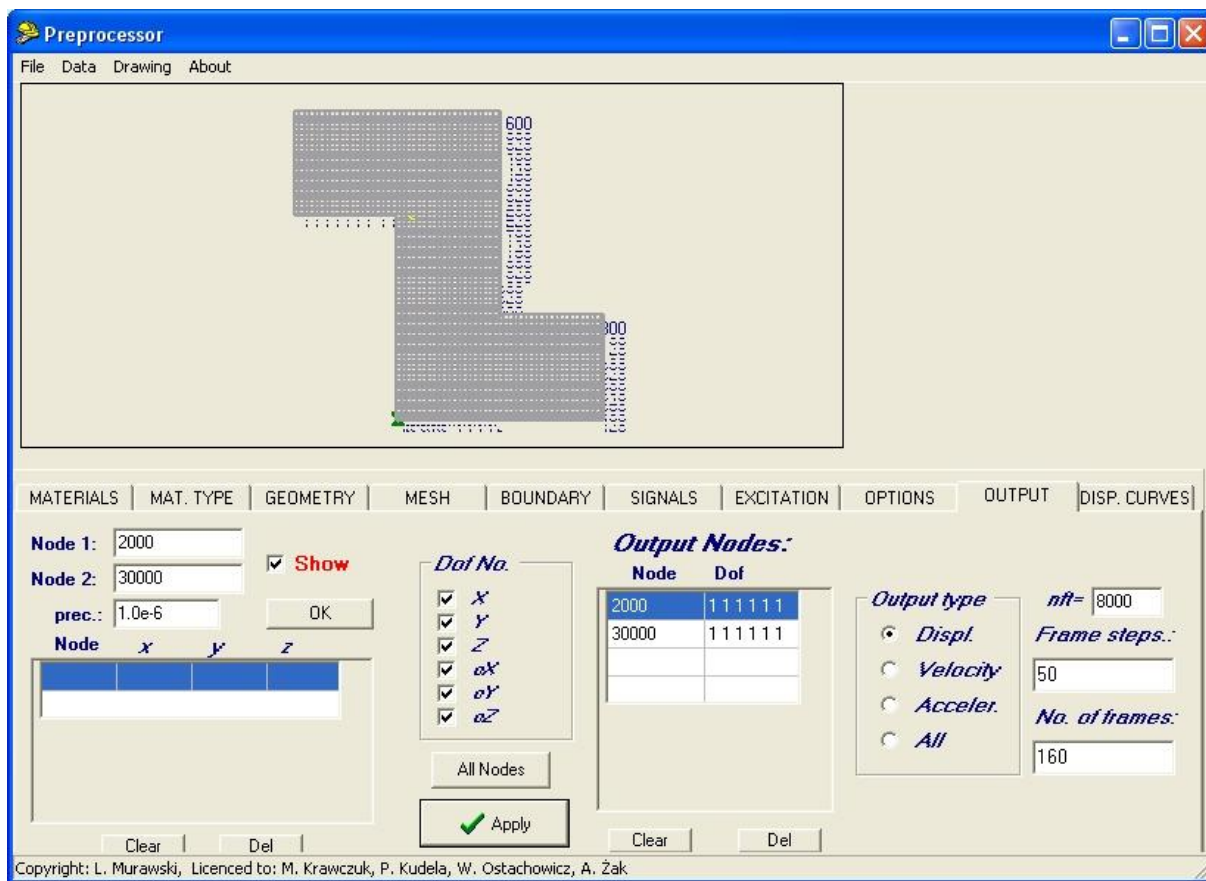


Rys.20 Okno programu z aktywną zakładką **OPTIONS**.

W oknie **Damping** użytkownik definiuje współczynnik tłumienia materiału. Sposób całkowania definiowany jest w oknie **Integration**. Możliwe jest wybranie całkowania metodą różnic skończonych (przycisk **FDM**) lub Newmarka (przycisk **Newmark**) . Okno **Excitation mode** służy do definiowania sposobu przyłożenia obciążeń – **Single** oznacza, że do układu wszystkie obciążenia są przyłożone jednocześnie, **Multi** obciążenia przykładane są wielokrotnie.

Przycisk **Apply** służy do zatwierdzenia przyjętych opcji.

W kolejnym oknie **OUTPUT** użytkownik definiuje sposób zapisu wyników obliczeń które stanowią dane wejściowe do programu postprocesora – Rys.21.



Rys.21 Okno programu z aktywną zakładką **OUTPUT**.

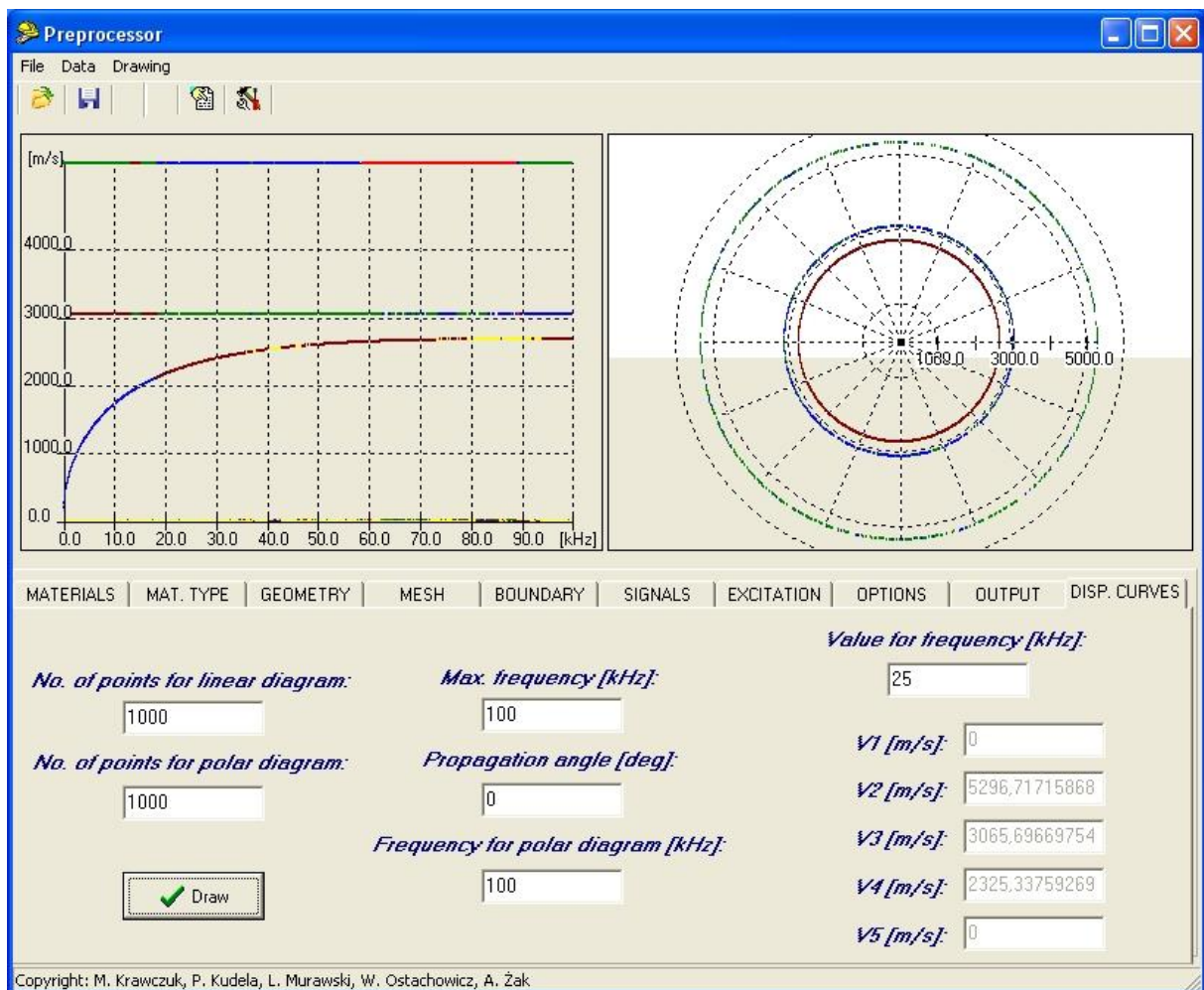
Wyniki obliczeń mogą dotyczyć pojedynczych węzłów lub całej analizowanej struktury. Użytkownik może zdefiniować jakie wielkości węzłowe go interesują w oknie **Output type** (przycisk **Displ.** oznacza przemieszczenia węzłowe, **Velocity** – prędkości węzłowe, **Acceler.** – przyspieszenia węzłowe, **All** – wszystkie powyżej wymienione wielkości węzłowe). Interesujące węzły w których wyniki są istotne dla użytkownika wybiera się w oknie **Node 1**, oraz definiuje stopnie swobody w oknie **Dof No.** - **X** oznacza przemieszczenia w kierunku osi x, **Y** oznacza przemieszczenia w kierunku osi y, **Z** oznacza przemieszczenia w kierunku osi z, **aX** oznacza kąt obrotu wokół osi x, **aY** oznacza kąt obrotu wokół osi y, **aZ** oznacza kąt obrotu wokół osi z. W przypadku gdy chce aby zapisywane były wyniki dotyczące wszystkich węzłów wybiera przycisk **All Nodes**. Przycisk **Apply** służy do zatwierdzenia wyboru, **Del** umożliwia usuwanie wybranych węzłów, a **Clear** do usunięcia wszystkich wybranych węzłów. Lista wybranych węzłów i stopni swobody wyświetlana jest w oknie **Output Nodes**.

Uwaga 1: W przypadku wyboru dwóch węzłów (**Node 1**, **Node 2**) program automatycznie zapisuje wyniki obliczeń dla wszystkich węzłów leżących na odcinku łączącym wybrane węzły.

Program umożliwia tworzenie animacji. W tym celu w oknie **No. of frames** podaje się liczbę klatek animacji, a w oknie **Frame steps** co ile kroków czasowych zapisywane są kolejne klatki animacji.

Uwaga 2: Iloczyn liczby klatek i kroków czasowych powinien być równy liczbie przyjętych kroków czasowych wyświetlanych w oknie **nft**.

Program umożliwia wyznaczanie krzywych dyspersji i prędkości propagujących fal sprężystych w danym materiale. W celu aktywacji tych opcji należy wykorzystać okno **DISP. CURVES** – Rys.22

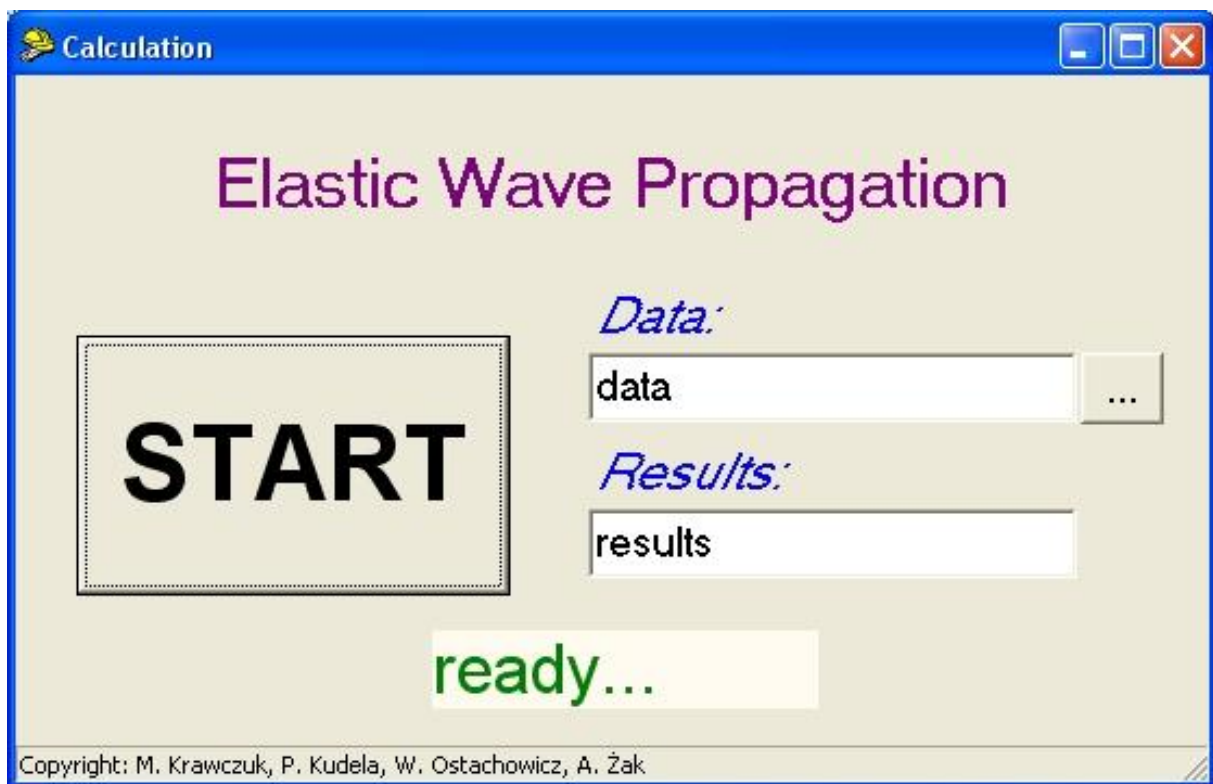


Rys.22 Okno programu z aktywną zakładką **DISP. CURVES**.

Użytkownik podaje parametry potrzebne do wyznaczenia krzywych dyspersji i prędkości propagujących fal poprzez podanie: Liczby punktów obliczeniowych potrzebnych do zbudowania wykresów (**No. of points for linear diagram, No. of points for polar diagram**), oraz podanie maksymalnej częstotliwości dla której oblicza się krzywe dyspersji (**Max. frequency**). Prędkość propagacji fal sprężystych można odczytać dla zadanej częstotliwości wybierając opcję **Value for frequency**. W oknach **V1-V5** wyświetlane są wartości obliczonych prędkości propagujących fal.

Przycisk **Draw** służy do rysowania wykresów krzywych dyspersji i prędkości propagacji fal.

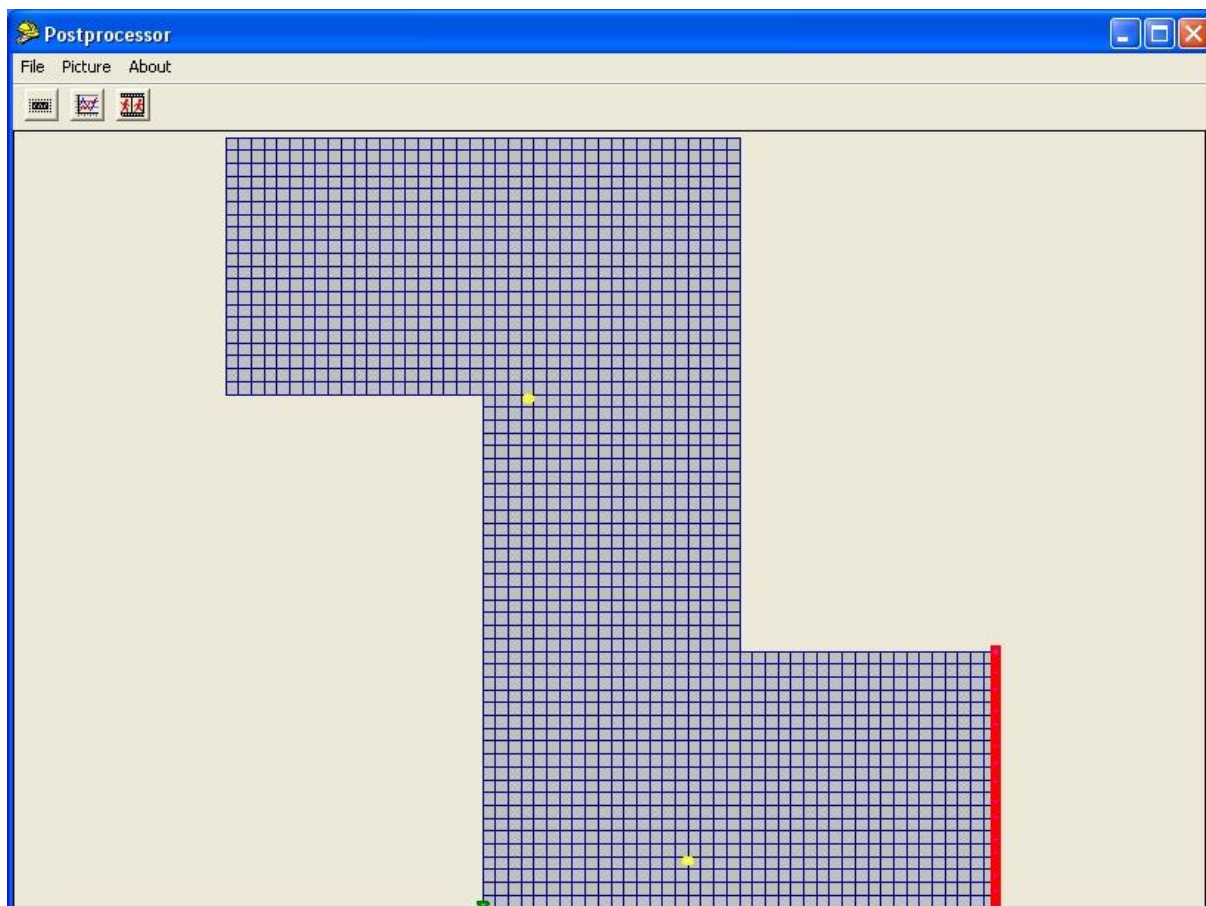
Po przygotowaniu danych do obliczeń użytkownik realizuje obliczenia w programie **Calculation**. Okno programu przedstawia Rys.23.



Rys.23 Okno programu **Calculation**.

Użytkownik definiuje zbiór danych wejściowych (**Data**) i wyjściowych (**Results**). Po naciśnięciu przycisku **START** rozpoczynają się obliczenia.

Po zakończeniu obliczeń możliwa jest wizualizacja wyników w programie **Postprocessor** – Rys.24



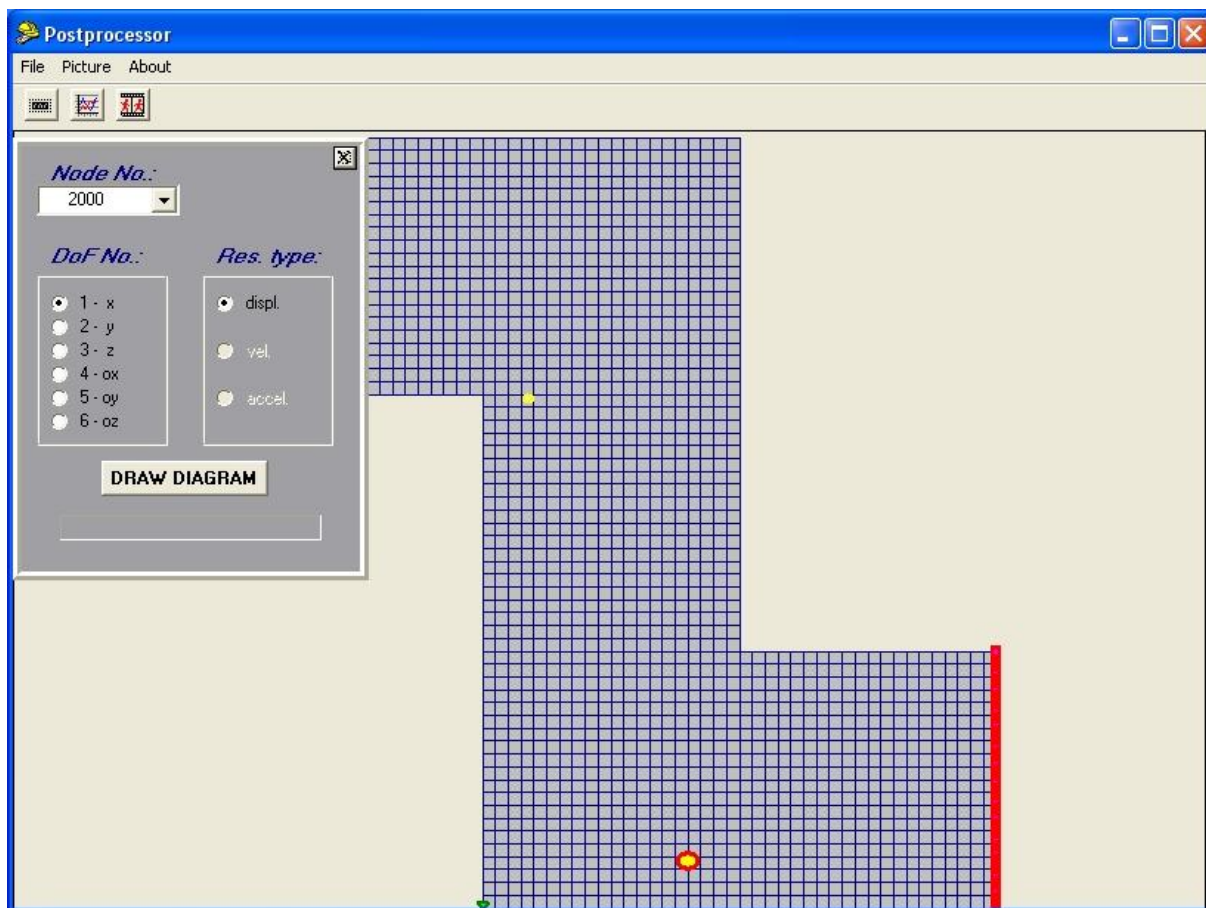
Rys.24 Okno programu **Postprocessor**.

W górnej listwie znajdują się trzy zakładki **File**, **Picture**, **About**.

Zakładka **File** służy do obsługi plików i posiada opcje: **Open** – otwieranie istniejących plików danych, **Exit** – zakończenie pracy z plikami.

Zakładka **Picture** służy do zapisu wyników graficznych. Możliwym jest zapis modelu – opcja **Save Model drawing**, lub zapis wykresu z wynikami – **Save Diagram drw**.

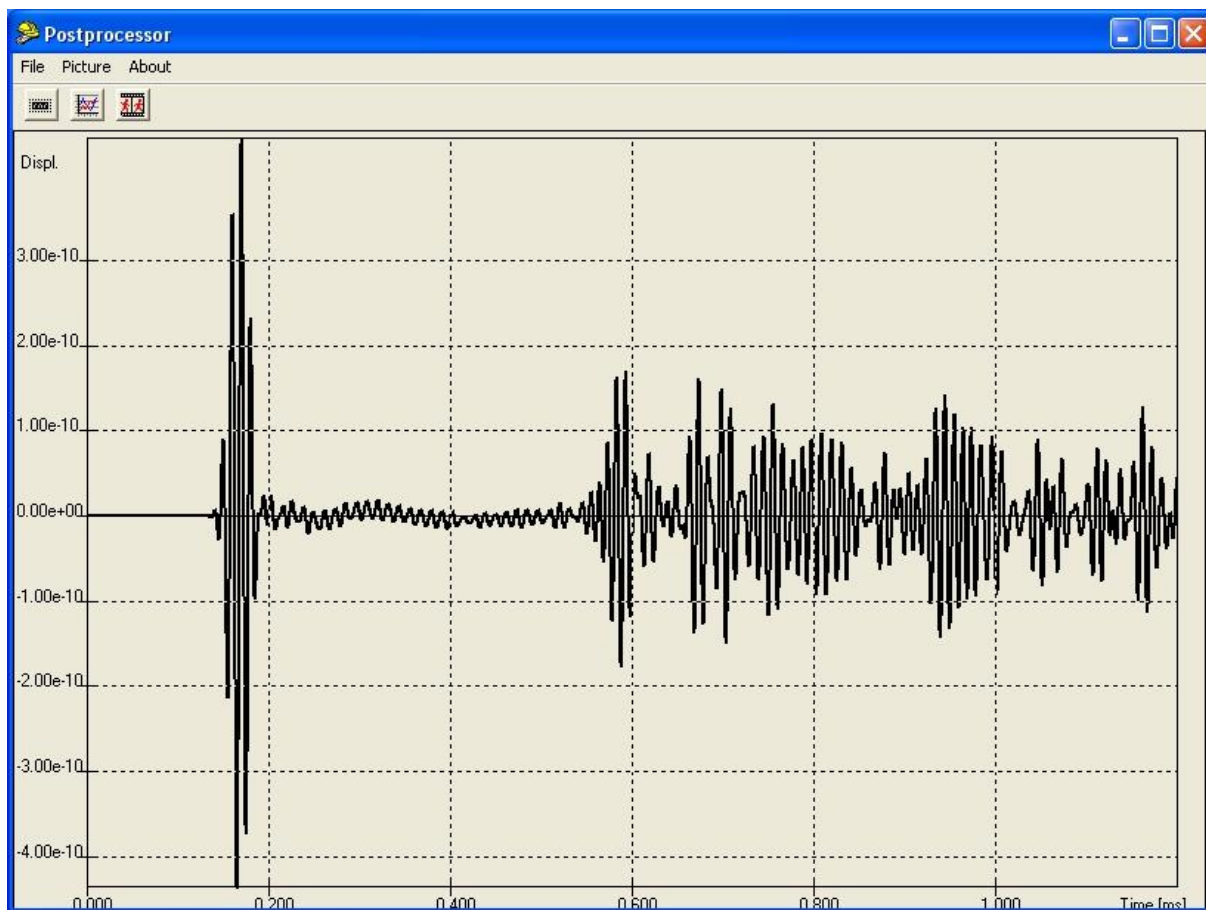
Do rysowania wykresów przebiegów odpowiedzi układu w wybranych węzłach służy środkowa ikona **DIAGRAM** – Rys.25.



Rys.25 Okno programu **Postprocessor** po aktywacji ikony **DIAGRAM** do rysowania wykresów.

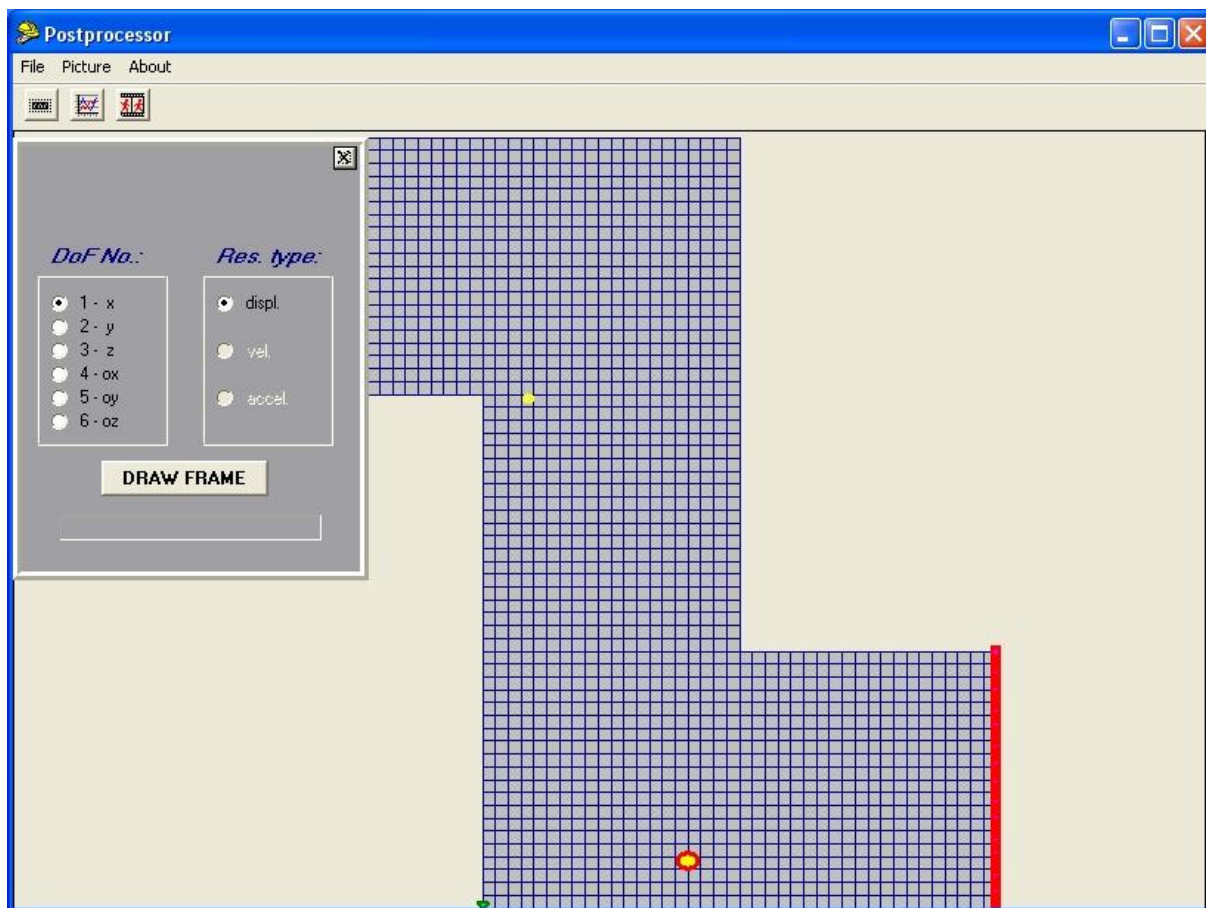
Opcja **DIAGRAM** umożliwia rysowanie wykresów przebiegu propagacji fali w wybranych węzłach (**Node No.**) dla zadanego kierunku (**DoF No**) i wybranej wielkości (**Res. type**) – takiej jak przemieszczenia (**displ.**) prędkości (**vel.**) i przyspieszenia (**accel.**).

Przykład wyników obliczeń analizowanej płyty przedstawia Rys.26.



Rys.26 Okno programu **Postprocessor** po aktywacji ikony **DIAGRAM** do rysowania wykresów – wykres przemieszczeń w wybranym węźle.

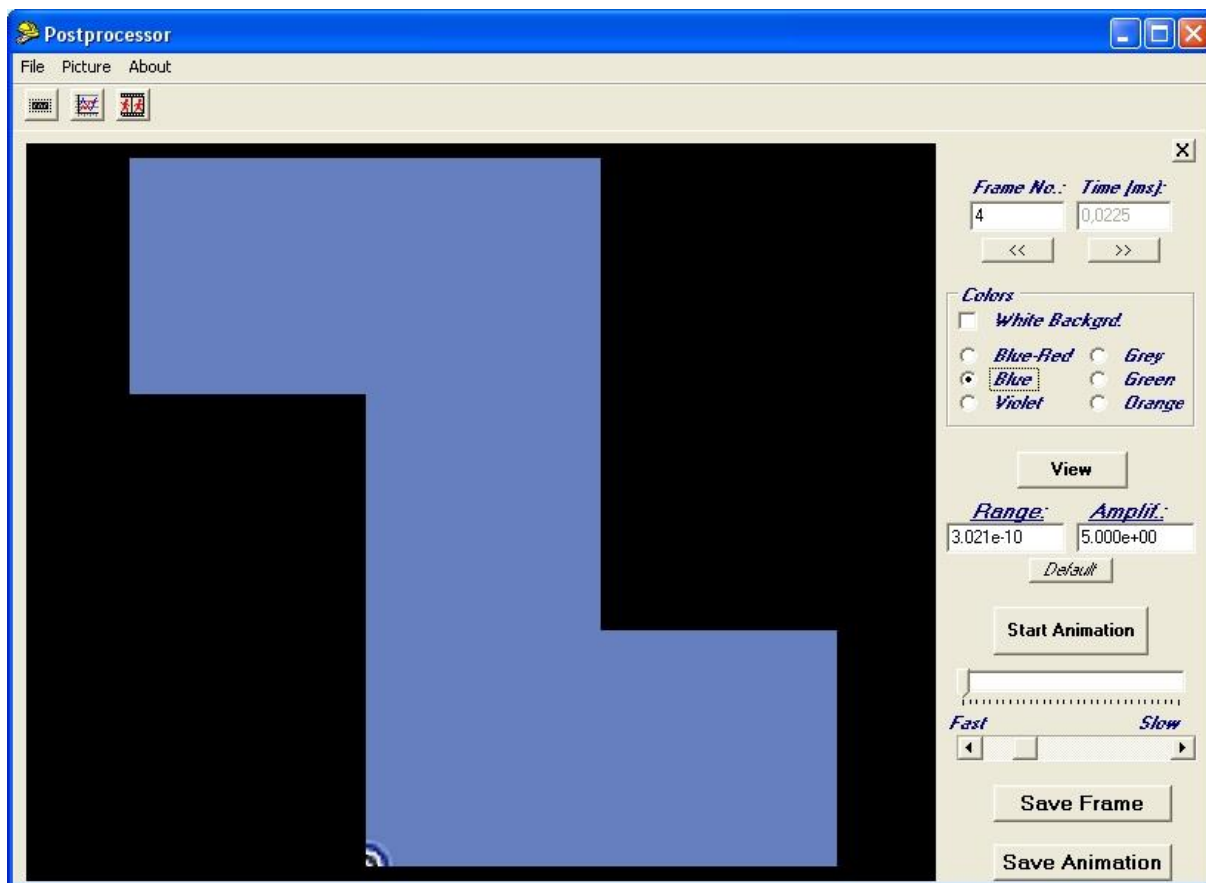
Do tworzenia animacji z przebiegów odpowiedzi całej konstrukcji służy prawa ikona **ANIMATION** – Rys.27.



Rys.27 Okno programu **Postprocessor** po aktywacji ikony **ANIMATION** do tworzenia animacji.

Opcja **ANIMATION** umożliwia tworzenie animacji z przebiegu propagacji fali w analizowanej konstrukcji (**Node No.**) dla zadanego kierunku (**DoF No**) i wybranej wielkości (**Res. type**) – takiej jak przemieszczenia (**displ.**) prędkości (**vel.**) i przyspieszenia (**accel.**).

Przykład klatki animacji analizowanej płyty przedstawia Rys.28.

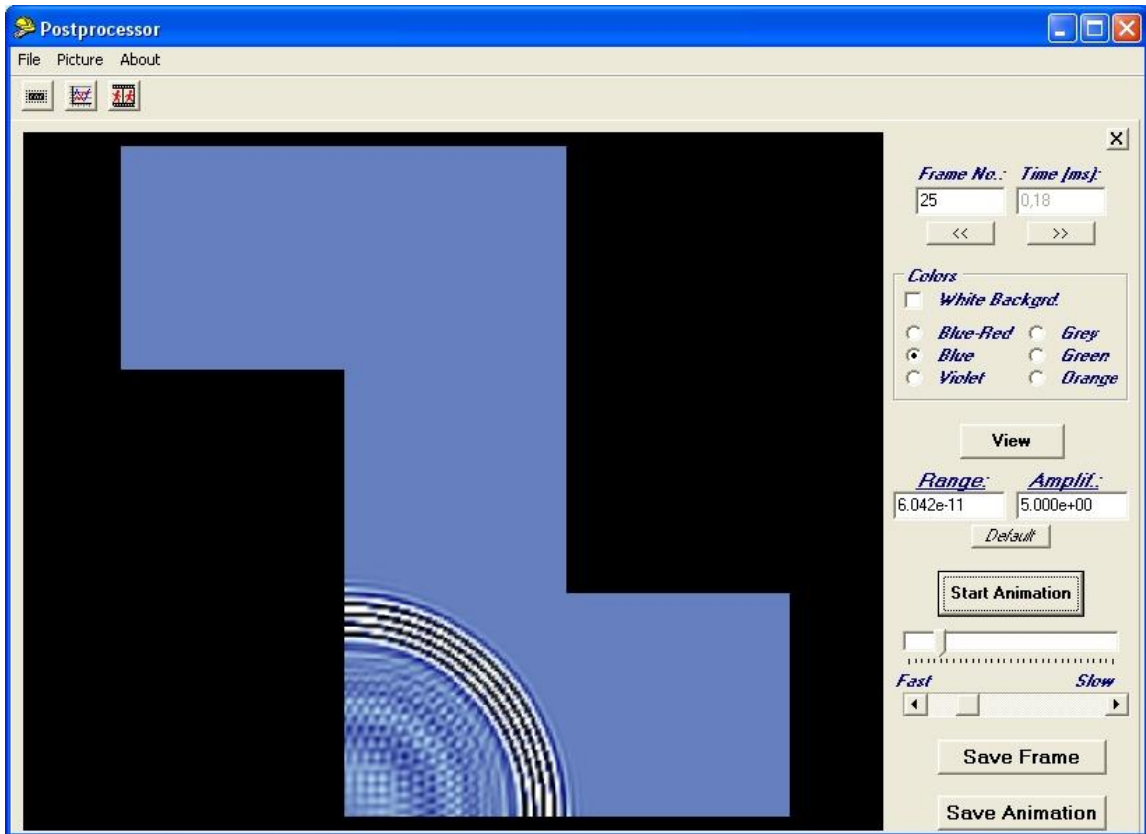


Rys.28 Okno programu **Postprocessor** po aktywacji ikony **ANIMATION** do tworzenia animacji.

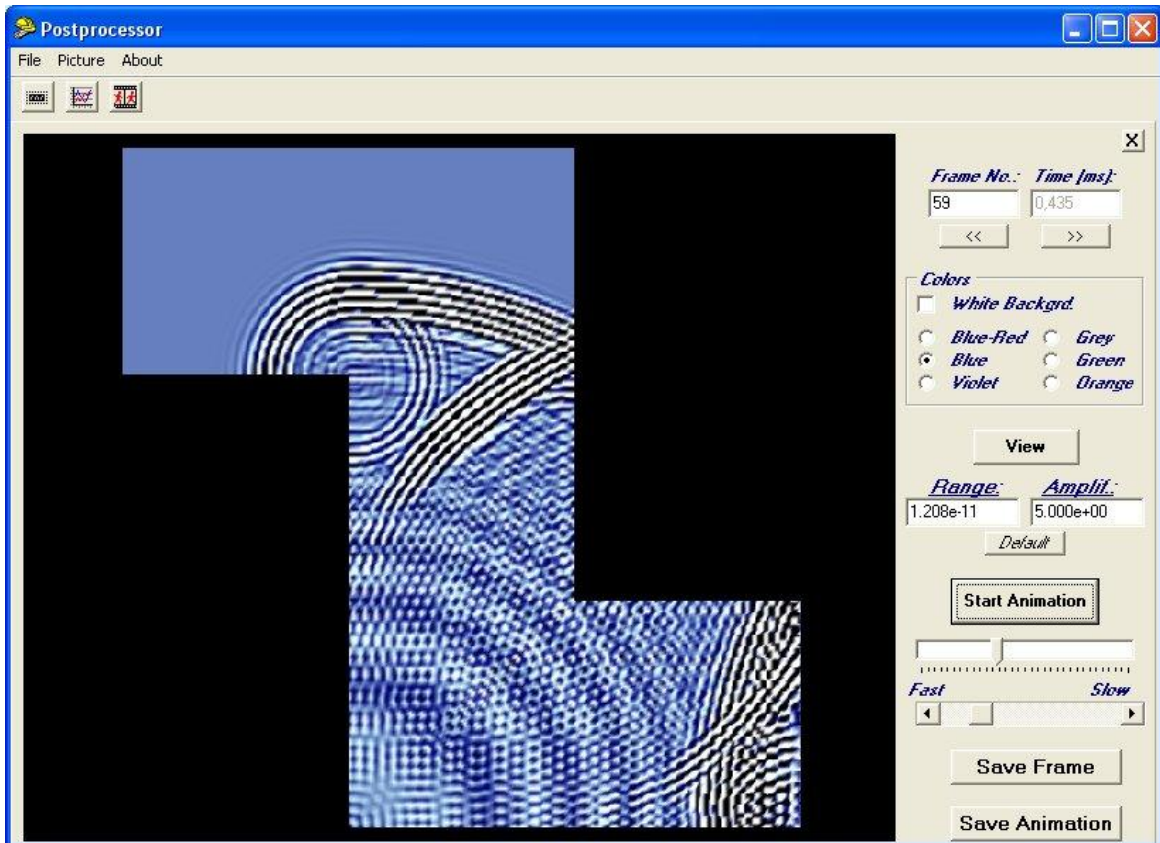
Użytkownik może rozpocząć animację przyciskiem **Start Animation**, zmieniając jej prędkość za pomocą suwaka (**Fast/Slow**). Istnieje możliwość wyboru kolorów tła (**Colors**) oraz wzmocnienia wyników (**View**).

Użytkownik może zapisać wybrane okno animacji (**Save Frame**) lub całą animację (**Save Animation**).

Przykładowe klatki animacji przedstawiono na Rys.29-30.



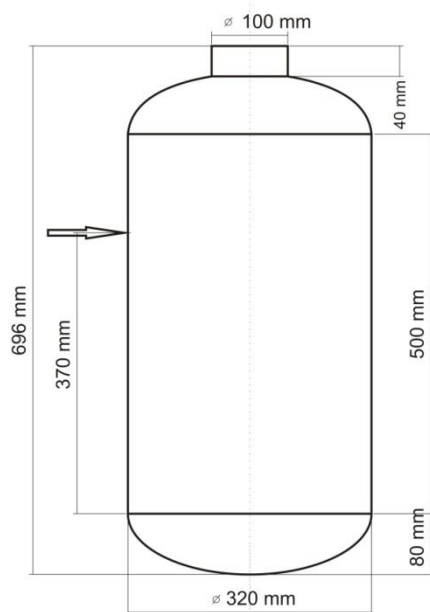
Rys.29 Okno programu **Postprocessor** – 25 klatka animacji.



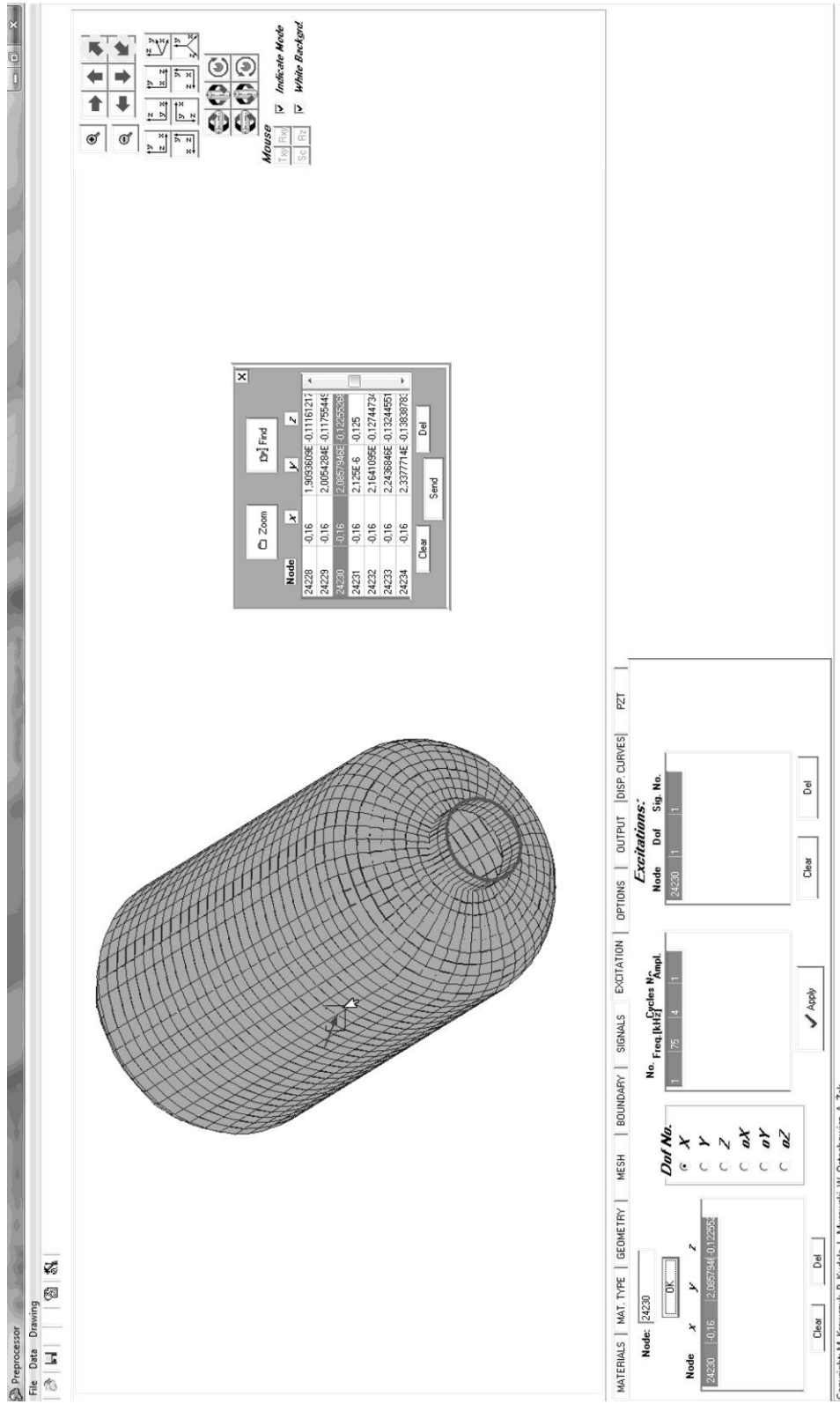
Rys.30 Okno programu **Postprocessor** – 59 klatka animacji.

3. PRZYKŁAD MOŻLIWOŚCI OBLICZENIOWYCH PROGRAMU

Metodę przeprowadzania obliczeń z wykorzystaniem programu EWPro przedstawiono na przykładzie zbiornika ciśnieniowego zbudowanego z aluminium. Grubość ścianek zbiornika wynosi 10 mm. Widok modelu fizycznego zbiornika przedstawiono na Rys. 31. Przyjęto, że wymuszenie fali sprężystej będzie aktywowane na wysokości 370 mm od podstawy zbiornika (Rys. 31), w kierunku normalnym do jego powierzchni. Wymuszenie zostanie zrealizowane poprzez siłę okresową o częstotliwości 75 kHz, ograniczoną obwiednią Hanninga do czterech cykli. Całkowity czas działania wymuszenia wyniesie 0.5 ms. Widok modelu zbiornika zbudowanego w preprocesorze programu EWPro przedstawiono na Rys. 32.



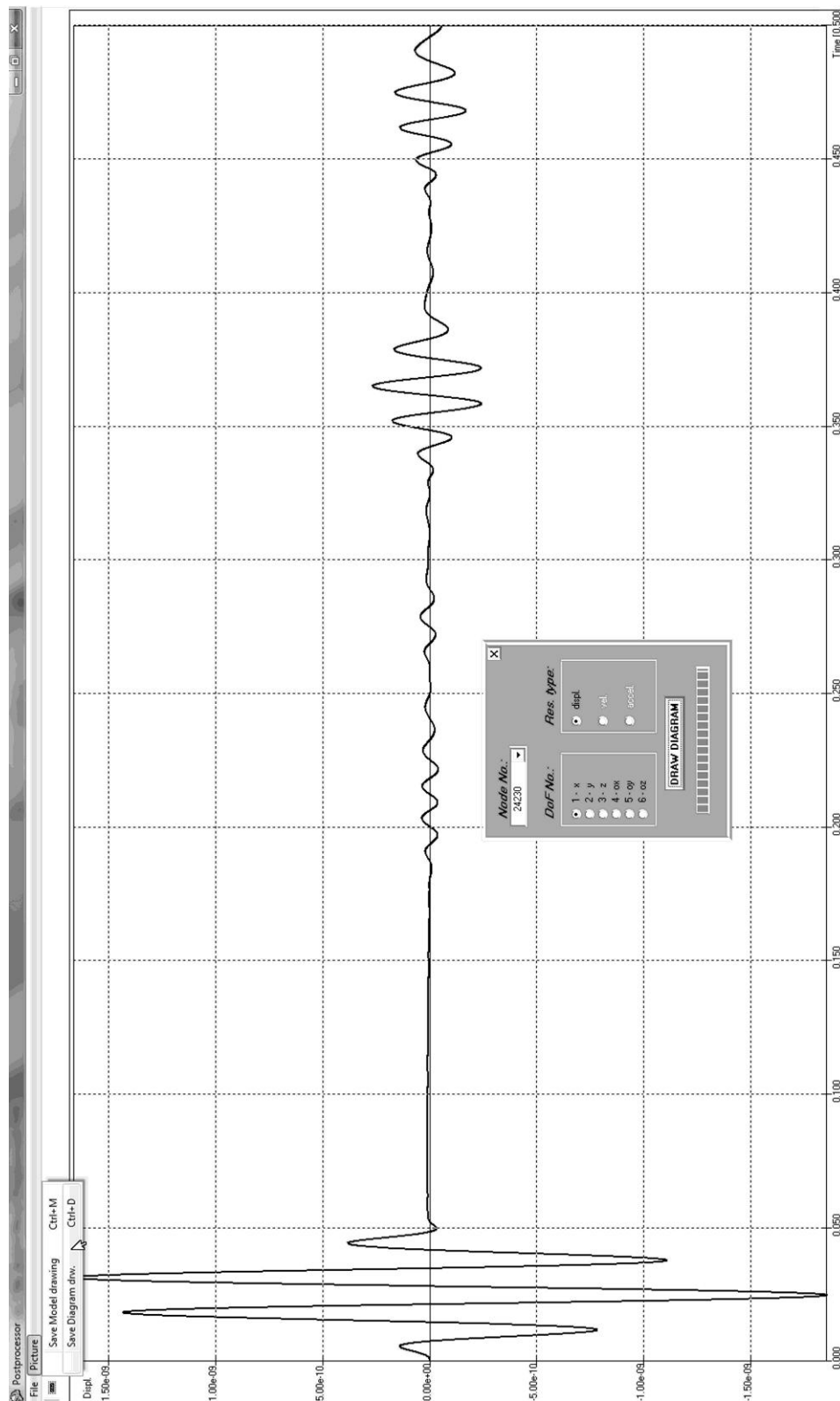
Rys. 31. Widok modelu fizycznego zbiornika ciśnieniowego.



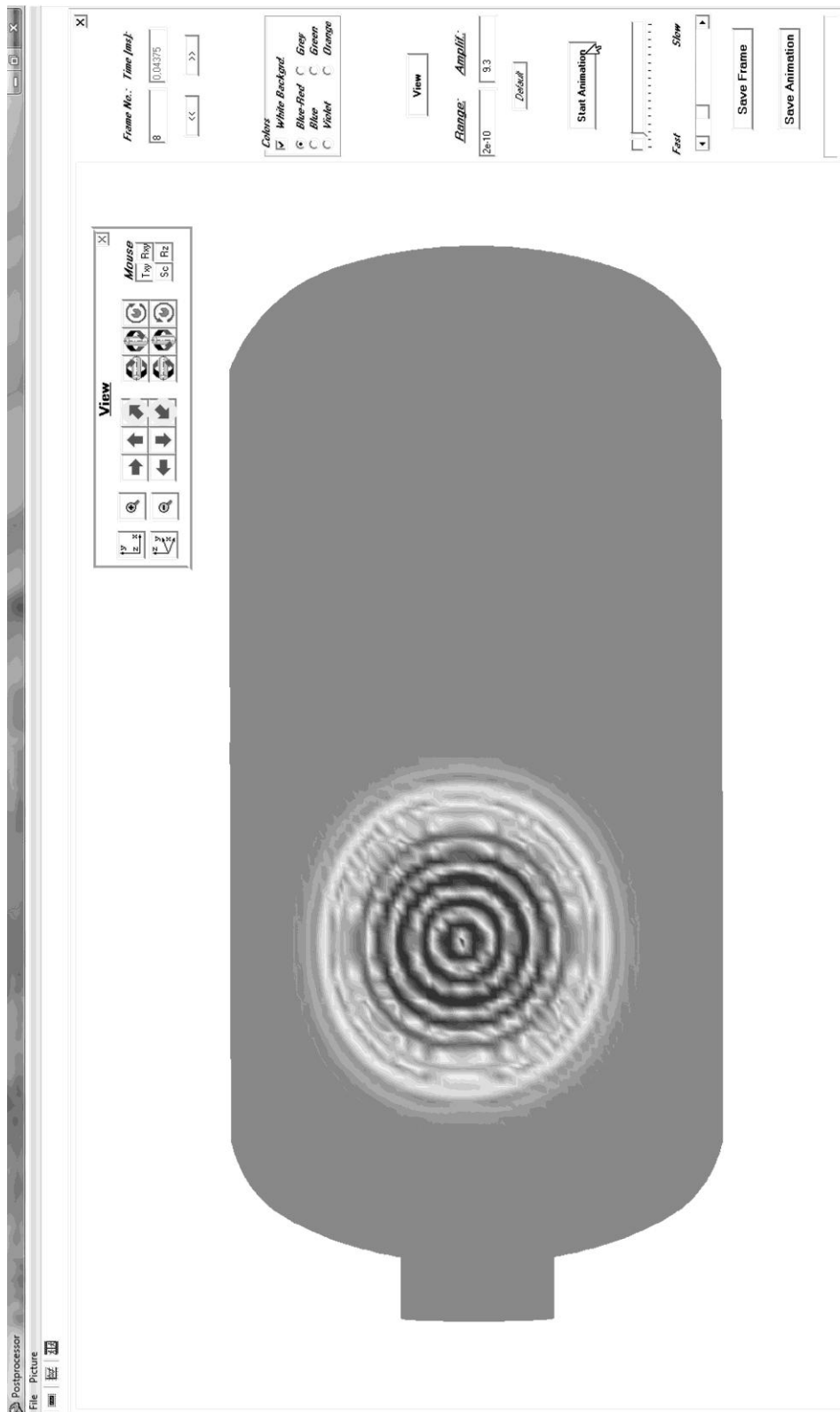
Rys. 32. Widok okna preprocesora z modelem zbiornika ciśnieniowego.

Postprocesor programu EWavePro został przystosowany do analiz wyników obliczeń przebiegu fal sprężystych w modelach przestrzennych 3–D. Jedną z możliwości postprocesora jest tworzenie wykresów przebiegu amplitud fali sprężystej w wybranym węźle w funkcji czasu. Na Rys. 33 przedstawiono amplitudy przemieszczeń węzła, w stopniu swobody, w którym przyłożono wymuszenie.

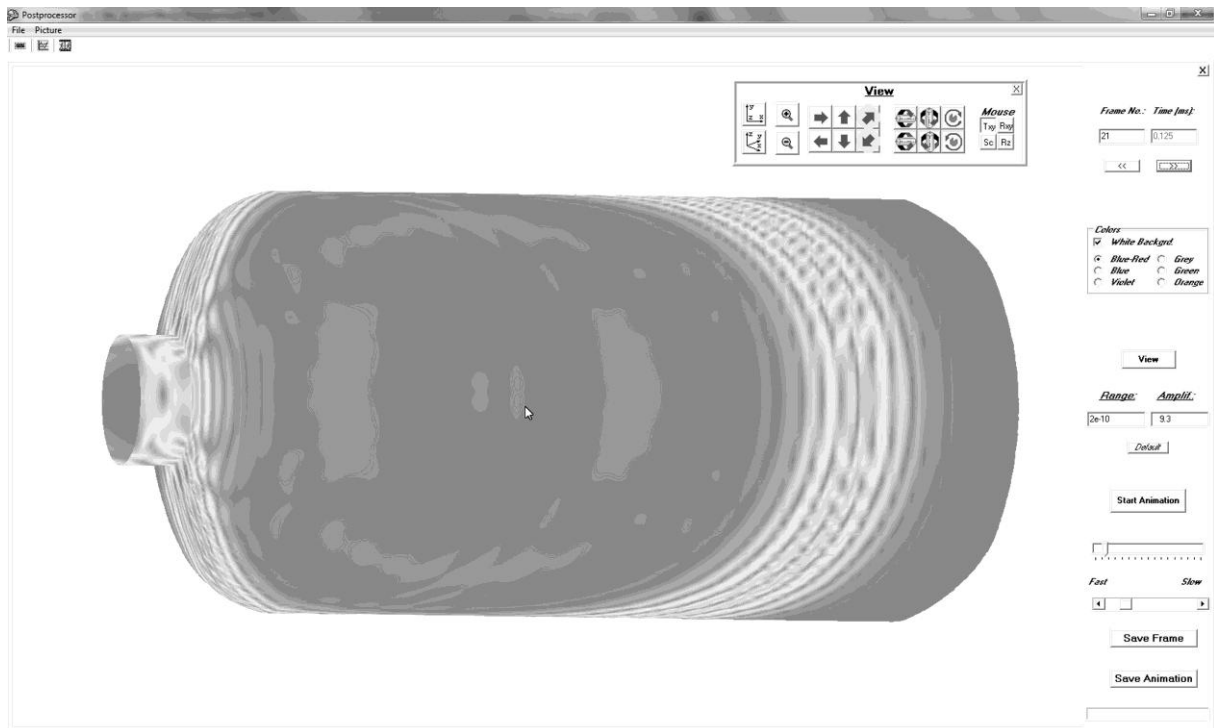
Istotną funkcją postprocesora jest możliwość prezentacji animacji propagacji fal sprężystych w elementach konstrukcyjnych. Postprocesor umożliwia prezentację elementów konstrukcyjnych w przestrzeni trójwymiarowej. Na Rys. 34 przedstawiono jedną z pierwszych (ósmą) klatkę propagacji fal sprężystych w zbiorniku ciśnieniowym. Na Rys. 35–38 przedstawiono kolejne etapy propagacji fal sprężystych w tym zbiorniku. Przedstawiono kolejno: 21, 27, 39 i 60 klatkę propagacji fal sprężystych w zbiorniku. Rysunki z klatkami nr 8, 21 i 60 przedstawiają widok zbiornika od strony wymuszenia. Natomiast rysunki z klatkami nr 27 i 39 przedstawiają widok zbiornika od strony przeciwnej do wymuszenia.



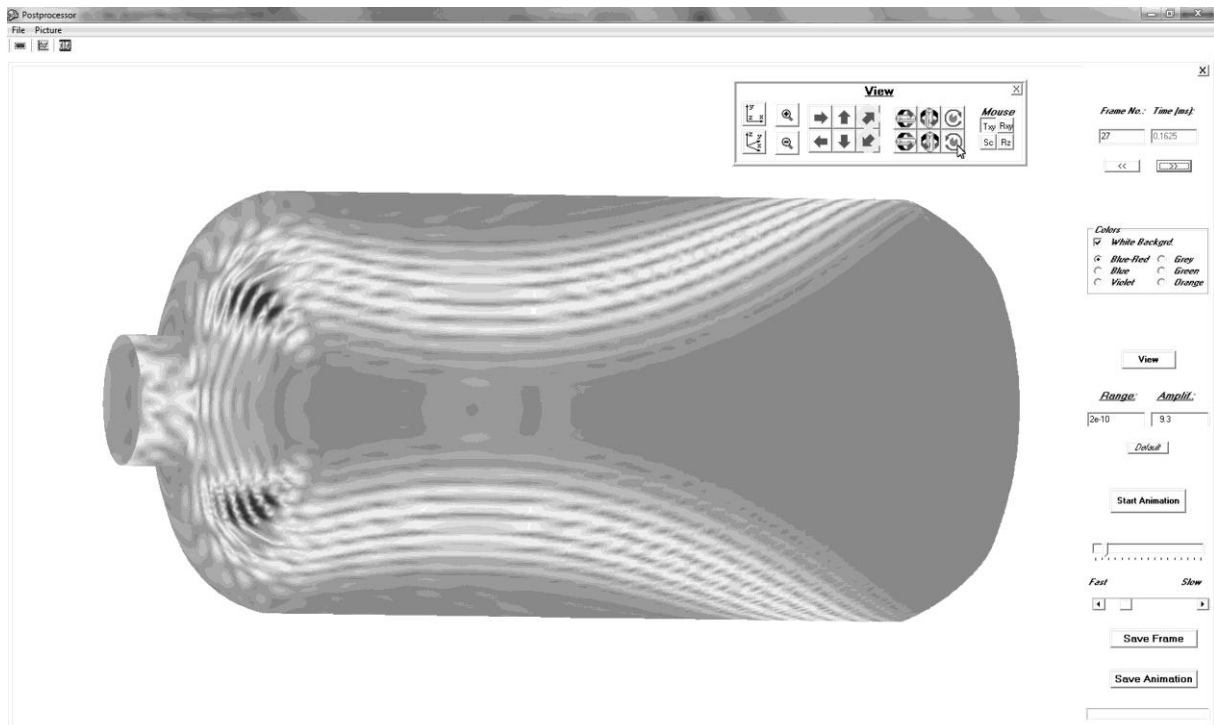
Rys. 33. Przebieg amplitud fali sprężystej w funkcji czasu stopnia swobody węzła, w którym przyłożono wymuszenie, modelu zbiornika ciśnieniowego.



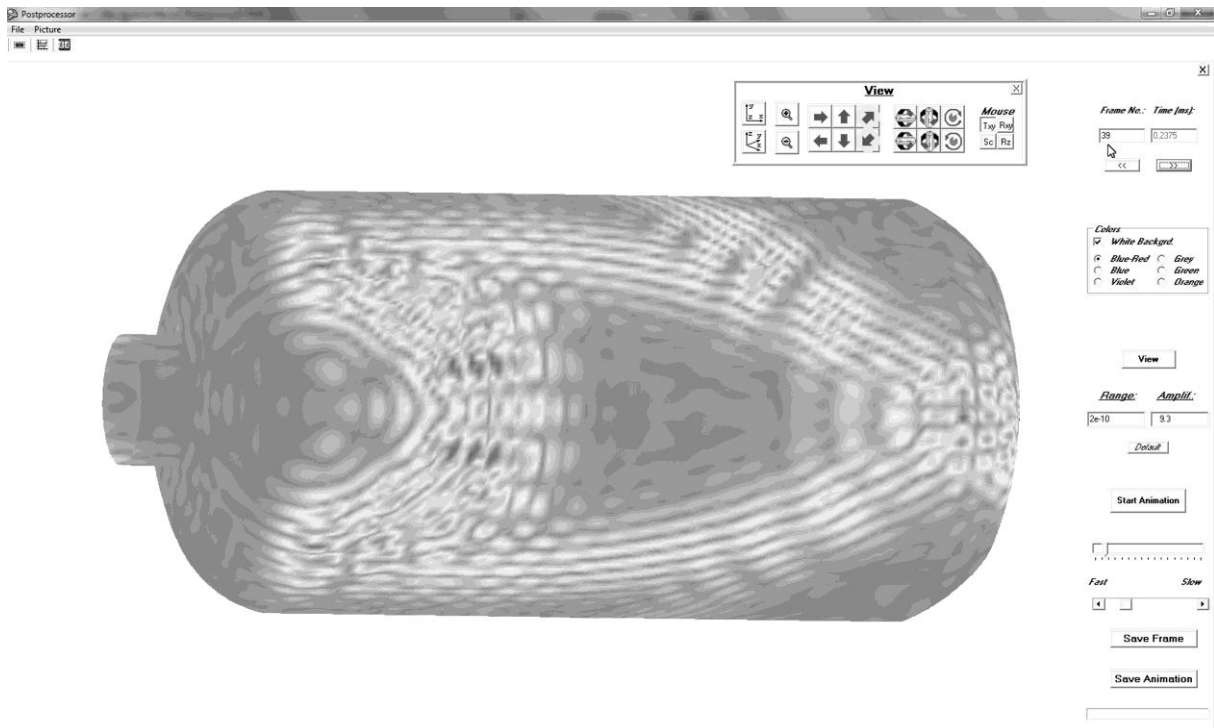
Rys. 34. Ósma klatka propagacji fal sprężystych w modelu zbiornika ciśnieniowego; widok zbiornika od strony wymuszenia.



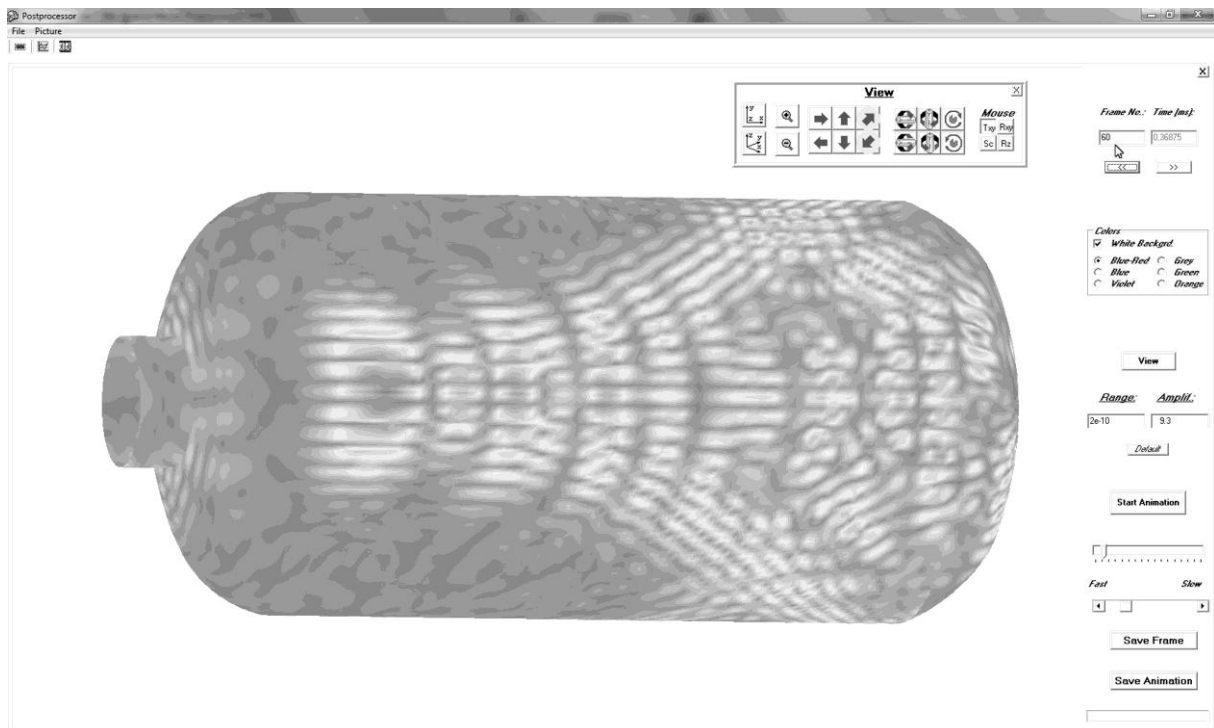
Rys. 35. Dwudziesta pierwsza klatka propagacji fal sprężystych; widok zbiornika od strony wymuszenia.



Rys. 36. Dwudziesta siódma klatka propagacji fal sprężystych; widok zbiornika od strony przeciwnej do wymuszenia.



Rys. 37. Trzydziesta dziewiąta klatka propagacji fal sprężystych; widok zbiornika od strony przeciwnej do wymuszenia.



Rys. 38. Sześćdziesiąta klatka propagacji fal sprężystych; widok zbiornika od strony wymuszenia.

4. LITERATURA

- [1] J. P. Boyd: *Chebyshev and Fourier spectral methods*. Dover Publications, Inc., 2000.
- [2] C. Pozrikidis: *Introduction to finite and spectral element methods using MATLAB*. Chapman & Hal, CRC, 2005.
- [3] O.O. Ochoa and J.N. Reddy: *Finite Elements Analysis of Composite Laminates*. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [4] W.Ostachowicz i inni Projekt kluczowy nr POIG.01.01.02-00-015/08 „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” – Raport grudzień 2009.
- [5] W.Ostachowicz i inni Projekt kluczowy nr POIG.01.01.02-00-015/08 „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” – Raport maj 2010.