



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

Kierunek studiów:
Mechanika i Budowa Maszyn

Sebastian Lipiec

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

*Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki”
nr FERS.01.05-IP.08-0234/23*



Spis treści

1. Charakterystyka środowiska programu Abaqus	3
2. Pierwsze kroki w programie Abaqus.....	5
3. Przykład wprowadzający	8
3.1. Tworzenie geometrii modelu- moduł Part.....	9
3.2. Definicja charakterystyki materiałowej i przypisanie jej do przekroju- moduł Property	15
3.3. Ustalenie rozmieszczenia części tworzących model w przyjętym układzie odniesienia- moduł Assembly	18
3.4. Określenie szczegółów obliczeń numerycznych (typ analizy, poszczególne kroki rozwiązania) - moduł Step	19
3.5. Definicja warunków brzegowych modelu: działających obciążeń i występujących umocowań- moduł Load.....	20
3.6. Opracowanie siatki elementów skończonych (ES)- moduł Mesh	23
3.7. Przygotowania obliczeń numerycznych i ich inicjacja- moduł Job.....	25
3.8. Przegląd wyników obliczeń- moduł Visualization	26
4. Przykład do samodzielnej realizacji	29
5. Literatura	30



Utwór objęty licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>





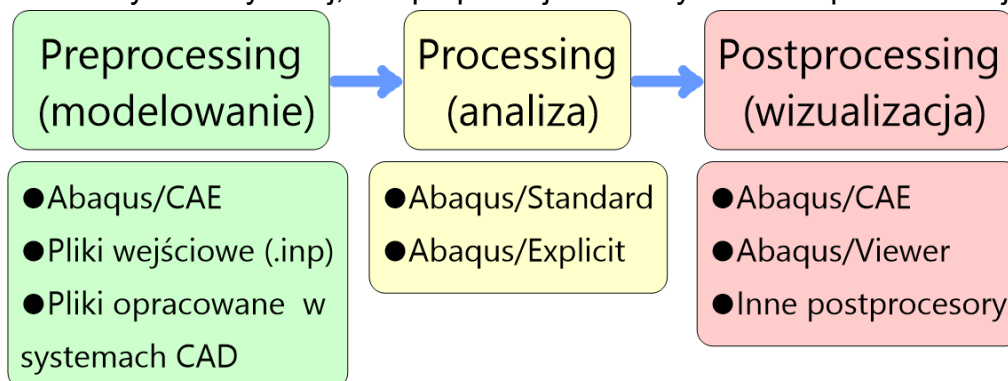
1. Charakterystyka środowiska programu Abaqus

Środowisko Abaqus jest zaawansowanym pakietem do realizacji symulacji numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). W zakresie rozwiązywania problemów w dziedzinie inżynierii mechanicznej najczęściej używane są moduły obliczeniowe: Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit oraz środowisko Abaqus/CAE (ang. Complete ABAQUS Environment). Moduł Abaqus/Standard jest modułem ogólnego przeznaczenia. W jego zakresie możliwa jest realizacja pełnego toku obliczeń: od stworzenia modelu, poprzez przypis modelu materiału, definicję kroków obliczeniowych, dyskretyzację, aż do przeprowadzenia obliczeń i przeglądanie wyników. Jeśli analizowane jest zagadnienie o charakterystyce dynamicznej, w szczególności przy występowaniu nieliniowości zalecane jest wykorzystanie modułu Abaqus/Explicit. Popularnym środowiskiem do przeprowadzenia symulacji numerycznych wraz z analizą wyników jest Abaqus/CAE (*Abaqus 2016 Documentation*, 2025; Skrzat, 2014).

Typowe etapy rozwiązania zagadnienia z wykorzystaniem MES w programie Abaqus przedstawiono na schemacie zamieszczonym na rysunku 1. Rozpoczęcie pracy z programem wiąże się z koniecznością opracowania modelu, który będzie rozpatrywany w danym zagadnieniu. Etap ten realizowany być może w programie na kilka sposobów. W ramach niniejszego opracowania zaprezentowana będzie opcja przygotowania modelu w obszarze graficznym programu Abaqus Standard. Dla bardziej doświadczonych użytkowników sprawniejsza może być praca z plikami wejściowymi, np. plikami z rozszerzeniem .inp. Możliwe jest także zaimplementowanie geometrii modelu do programu Abaqus opracowanej w innym programie typu CAD. Po definicji wszystkich niezbędnych informacji o modelu możliwe jest uruchomienie obliczeń numerycznych. Użytkownik środowiska Abaqus ma do dyspozycji dwa solvery do realizacji obliczeń: Standard oraz Explicit. Przegląd wyników obliczeń numerycznych, ich analiza i opracowanie najczęściej realizowane jest w postprocesorze Abaqus/CAE, module wizualizacji programu (ABAQUS 6.12, 2020; Chróścielewski et al., 2014).



[Tekst alternatywny. Schemat blokowy realizacji obliczeń numerycznych w środowisku Abaqus. Uwzględnia po lewej stronie rysunku etap modelowania, w środku analizy numerycznej, zaś po prawej stronie rysunku etap wizualizacji.]



Rys. 1. Schemat realizacji obliczeń numerycznych w środowisku Abaqus.

Podczas pracy w środowisku Abaqus użytkownik spotka się z dużą liczbą plików generowanych przez program podczas analiz. Pliki te zlokalizowane będą w folderze roboczym, który zostanie wskazany przy instalacji programu. Domyślnie jest to folder o nazwie temp na dysku C. Charakterystycznymi (wybranymi) rozszerzeniami plików powstałymi przy pracy z programem Abaqus są (*Abaqus 2016 Documentation*, 2025; Lee, 2019):

- 1) **.cae**- plik z definicją wszystkich szczegółów opracowywanego modelu (plik binarny preprocesora).
- 2) **.dat**- w Abaqus/Standard plik wyjściowy danych z preprocesora. Zawiera informacje o weryfikacji poprawności opracowywanego modelu.
- 3) **.inp**- tekstowy plik wejściowy analizy. Bardzo ważne rozszerzenie plików z punktu widzenia sprawnej pracy w programie. W celu uruchomienia solvera w pliku tym powinny być zdefiniowane wszystkie szczegóły odnoszące się do geometrii modelu, parametrów materiałowych, warunków brzegowych, połączeń, szczegółów siatki ES, definicja inicjacji obliczeń oraz forma prezentacji wyników.
- 4) **.log**- tekstowy plik dziennika programu. Zawiera ważne informacje z punktu widzenia kontroli przebiegu symulacji: datę rozpoczęcia analizy, jej nazwę, informacje o postępie obliczeń, komunikaty błędach, ostrzeżeniach i informacje o zakończeniu obliczeń.
- 5) **.msg**- plik komunikatów. Ważny z punktu widzenia bieżącej kontroli poprawności realizowanych obliczeń. Jest generowany przez opcje analizy,

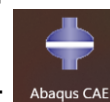


przedstawia sprawdzenie danych, w tym informacje o zbieżności rozpatrywanego zagadnienia i potencjalne błędy.

- 6) **.odb**- plik zawierający wyniki przeprowadzonej analizy. Odczytywany jest przez moduł wizualizacji programu (np. Abaqus/Viewer). Wykorzystanie pliku .odb eliminuje konieczność ponownego przeprowadzenia obliczeń (często długotrwałych), w przypadku powrotu do wcześniejszych analiz.
- 7) **.prt**- plik części. Zawiera informacje o tworzonych częściach lub złożeńiach. Wykorzystywany jest do analizy podmodeli.

2. Pierwsze kroki w programie Abaqus

W ramach niniejszego opracowania przedstawione zostanie wprowadzenie do programu. W celu jego uruchomienia należy odszukać na pulpicie lub w zasobach



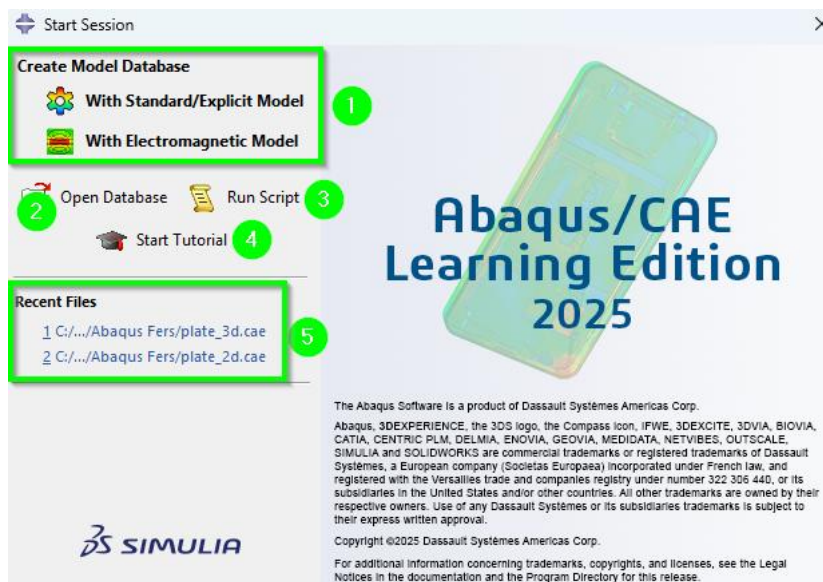
komputera program Abaqus/CAE z charakterystyczną ikonką: **Abaqus CAE**. Po uruchomieniu programu na ekranie pojawi się okno z możliwymi opcjami do wyboru (rys. 2):

- 1) **Create model database** (rys. 2: ❶) - opcja umożliwiająca rozpoczęcie pracy w celu stworzenia nowego modelu w: Abaqus/Standard, Explicit lub Electromagnetic.
- 2) **Open database** (rys. 2: ❷) - umożliwia odczytanie wcześniej przygotowanego modelu lub pliku z wynikami analizy.
- 3) **Run script** (rys. 2: ❸) - opcja pozwalająca na wczytanie przygotowanego skryptu w języku python. Wykorzystanie skryptów ze szczegółami modelu oraz analizy znacznie przyspiesza pracę nad tworzeniem i modyfikowaniem modelu numerycznego.
- 4) **Start tutorial** (rys. 2: ❹) - pozwala na uruchomienie zasobów z materiałami pomocniczymi dla użytkowników programu. Dostępna jest bardzo bogata baza wiedzy, bezcenna na etapie poznawania struktury programu.
- 5) **Recent Files** (rys. 2: ❺) - w obszarze tego okna wyświetlone są nazwy plików wraz z rozszerzeniem i lokalizacją, nad którymi pracowano podczas poprzedniego użytkowania programu. Z tej pozycji możliwe jest otworenie wskazanych plików.

[Tekst alternatywny. Zrzut ekranu ze startowej strony programu Abaqus/CAE. Po lewej stronie rysunku obrysowano prostokątami (zielona linia) i ponumerowano najważniejsze opcje. Po prawej stronie rysunku znajduje się napis powitalny oraz



informacja odnośnie wersji programu Abaqus: Abaqus/CAE Learning Edition 2025.]

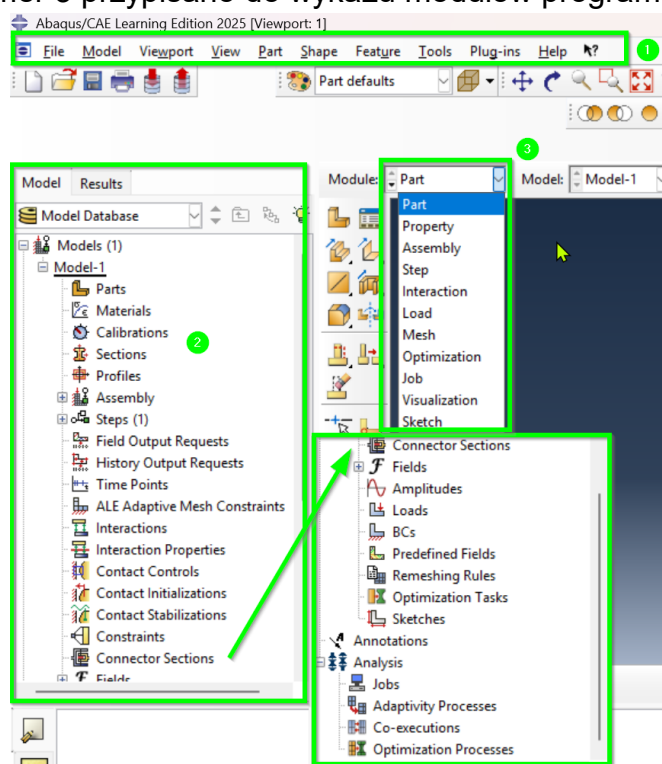


Rys. 2. Domyślne elementy startowe programu Abaqus/CAE.

Po poprawnym uruchomieniu Użytkownikowi domyślnie pojawi się widok programu jak pokazano na rysunku 2. Górny pasek narzędzi (rys. 3: ❶) służy do wyboru i zmiany poszczególnych opcji programu w zakresie: szczegółów dotyczących pliku, możliwości definicji modelu, dostępnych wariantów widoków, możliwości podziału na części danego modelu/i narzędzi do pracy z modelem oraz możliwości uzyskania pomocy w programie. Każda z pozycji znajdujących się na górnym pasku narzędzi charakteryzuje się mnogością opcji. Zaleca się przy zapoznawaniu programu Abaqus na dokładny przegląd wszystkich dostępnych opcji w tym zakresie. Ważnym elementem w sprawnej pracy z programem Abaqus jest kontrola poszczególnych opcji drzewka programu, znajdującego się domyślnie po lewej stronie ekranu (rys. 3: ❷). Widoczne będą w tej lokalizacji wszystkie działania przeprowadzone przez Użytkownika w procesie opracowywania szczegółów modelu numerycznego. Z poziomu drzewka programu istnieje możliwość (najbardziej dogodna) edycji poszczególnych opcji programu. Program Abaqus w sposób intuicyjny przedstawia poszczególne etapy opracowywania modelu numerycznego przez które Użytkownik musi przejść podczas pracy. Realizowane jest to poprzez opcję moduły (rys. 3: ❸). W lokalizacji tej dostępne są poszczególne etapy (moduły) pracy z programem: definicja dotycząca założeń wstępnych części (modelu), charakterystyki modelu (przede wszystkim wybór modelu materiałowego), określenie zależności pomiędzy

elementami w modelu, definicja parametrów kroków obliczeniowych, określenie ewentualnych wiązań i relacji występujących w modelu, definicja warunków brzegowych, moduł dedykowany opcji opracowania siatki elementów skończonych (ES), możliwość optymalizacji oraz opcje wyników (szczegóły i ustawienia solvera, zaawansowane opcje prezentacji wyników).

[Tekst alternatywny. Zrzut ekranu ze strony programu Abaqus/CAE. Na rysunku wydzielono najważniejsze opcje programu poprzez obwiednie wykonane zielonymi liniami i numerację. W górnej części rysunku numerem 1 oznaczono górny pasek narzędzi, po lewej stronie rysunku numerem 2 oznaczono drzewko opcji, w centralnej części rysunku numer 3 przypisano do wykazu modułów programu.]



Rys. 3. Standardowy widok programu Abaqus/CAE, przy rozpoczęciu tworzenia części.

Praca z modelem numerycznym w programie Abaqus/Standard obejmować będzie poszczególne etapy (moduły rys. 3: ③):

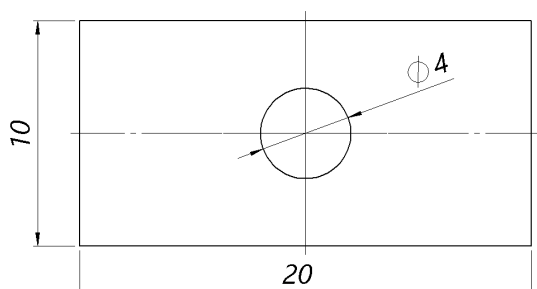
- 1) Tworzenie geometrii modelu- moduł Part.
- 2) Definicja charakterystyki materiałowej i przypisanie jej do przekroju- moduł Property.
- 3) Ustalenie rozmieszczenia części tworzących model w przyjętym układzie odniesienia- moduł Assembly.
- 4) Określenie szczegółów obliczeń numerycznych (typ analizy, poszczególne kroki rozwiązania) - moduł Step.
- 5) Definicja warunków brzegowych modelu: działających obciążeń i występujących umocowań- moduł Load.
- 6) Opracowanie siatki elementów skończonych (ES)- moduł Mesh.
- 7) Przygotowania obliczeń numerycznych i ich inicjacja- moduł Job.
- 8) Przegląd wyników obliczeń- moduł Visualization.

3. Przykład wprowadzający

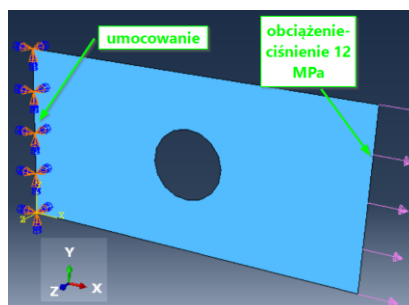
Wprowadzeniem w szczegóły pracy programu Abaqus będzie przykład zamodelowania równomiernie rozciąganej tarczy z centralnym otworem, o wymiarach przedstawionych na rysunku 4a. Tarcza będzie poddana obciążeniu w postaci ciśnienia o wartości 12 MPa (rys. 4b). W ramach niniejszego rozdziału zaprezentowany będzie tok rozwiązania modelu w programie Abaqus wersja 2025. Przedstawione rozwiązanie umożliwiło będzie Czytelnikowi odtworzenie poszczególnych kroków symulacji w ogólnodostępnej, edukacyjnej wersji programu.

[Tekst alternatywny. Rysunki przedstawiające szczegóły przykładu wprowadzającego. Rysunek oznaczony jako a przedstawia wymiary modelu, zaś oznaczenie b prezentuje model z wymaganymi warunkami brzegowymi wraz z narzuconym układem współrzędnym.]

a)



b)



Rys. 4. Element rozpatrywany w ramach wprowadzenia do programu Abaqus: a) wymiary elementu, b) schemat wymaganych warunków brzegowych.



3.1. Tworzenie geometrii modelu- moduł Part

Pracę przy tworzeniu modelu numerycznego w programie Abaqus rozpoczyna się w module części (Part) (rys. 5: ②). Ma to na celu opracowanie geometrii pojedynczej lub zespołu części do których będzie przykładane obciążenie. Inicjacji tworzenia części można dokonać poprzez opcję Part na pasku narzędzi w centralnej części okna programu (rys. 5: ③). Pojawi się wówczas okno, gdzie należy zdefiniować poszczególne parametry tworzonej części. Możliwe jest określenie nazwy tworzonej części (rys. 5: ④). Odpowiednio przyjęta nazwa jest niezwykle ważna przy identyfikacji poszczególnych części przy złożeniach, w szczególności obejmujących znaczącą liczbę podzespołów. Domyślna nazwa pierwszej tworzonej części to Part-1. W kolejnym kroku należy zdefiniować rodzaj rozpatrywanego zagadnienia (rodzaj modelu), gdzie w programie Abaqus jest to opcja wyboru przestrzeni modelowania (rys. 5: ⑤). Dostępne są warianty (Szturomski, 2013):

- 1) **Model trójwymiarowy 3D**- wówczas część tworzona jest domyślnie w układzie współrzędnych X i Y, z zadaną grubością w kierunku Z. Tworzenie części 3D w programie Abaqus module Part jest bardzo podobne do innych programów typu CAD, możliwa jest edycja części poprzez wycięcia, wykonanie otworów, sfazowań, zaokrągleń i inne sposoby edycji geometrii. Dla modelu trójwymiarowego w rozwoju przygotowania analizy możliwe jest wykorzystanie różnych typów ES. Mogą to być elementy: bryłowe, powłokowe, belkowe, kratownice oraz membrany.
- 2) **Model dwuwymiarowy 2D**- w tym wariantcie część opracowywana jest w układzie współrzędnych X-Y. W zależności od rozpatrywanego zagadnienia możliwy jest wybór rozwiązania zakładającego m.in. płaski stan naprężeń (plane stress) lub płaski stan odkształceń (plane strain). Najważniejszą zaletą modeli 2D jest uproszczenie części oraz zmniejszenie czasu trwania symulacji numerycznych. Do opracowania modelu można wykorzystać dwuwymiarowe elementy: belkowe oraz kratownice.
- 3) **Model osiowosymetryczny**- część tworzona jest w układzie X-Y, jednak dodatkowo względem modelu 2D istnieje konieczność wskazania osi obrotu. Model osiowosymetryczny predysponowany jest do zastosowania w przypadku rozpatrywania problemów, gdzie geometria elementu i warunki brzegowe są symetryczne względem osi obrotu (np. przypadki wałów, rurociągów, zbiorników ciśnieniowych). Ważną cechą modeli osiowosymetrycznych jest zmniejszenie liczby elementów skończonych (względem modelu 3D), co skutkuje zmniejszeniem czasu potrzebnego do obliczeń numerycznych. Elementy skończone przewidziane do zastosowania w tego typu modelu to osiowosymetryczne elementy powłokowe.





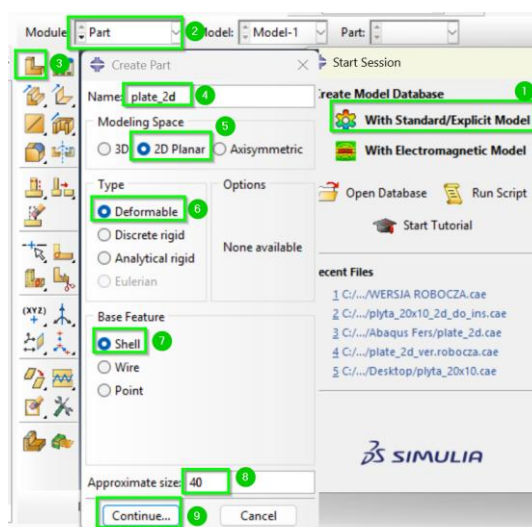
W kolejnym etapie definicji części w programie Abaqus należy wskazać jej charakterystykę zachowania się pod względem obciążenia, spośród dostępnych domyślnie opcji (rys. 5: ❹):

- 1) **Odkształcalny (deformowalny- deformable)** - opcja ta zakłada, iż tworzona część będzie ulegała odkształceniu pod wpływem przyłożonego obciążenia. Obciążenie te może mieć źródło mechaniczne, termiczne, elektryczne, magnetyczne lub inne dostępne w programie.
- 2) **Dyskretny sztywny (discrete rigid)** - wybór tej opcji skutkuje tym, iż część nie ulega deformacji, pod wpływem przyłożonego obciążenia. Co bardzo ważne, część tworzona przy założeniu dyskretnego sztywności może mieć dowolnie skomplikowany kształt.
- 3) **Analityczna sztywna (analytical rigid)** - część, która pod wpływem przyłożonego obciążenia nie wykazuje odkształceń. W porównaniu do opcji discrete rigid do tworzenia części nie można zastosować skomplikowanych kształtów. Użytkownik programu przy tworzeniu części ma do dyspozycji wybrane narzędzia ze szkicownika: linie, łuki oraz parabole.
- 4) **Analiza Eulera (Eulerian)**- opcja tworzenia części, w której możliwe jest przemieszczenie („przepłynięcie”) materiału przez granice elementów skończonych w opracowanej siatce (przy założeniu sztywności). W takim przypadku unika się problemu jakości siatki ES, w szczególności przy znacznej jej deformacji, m.in. w zagadnieniach dużych poziomów odkształceń plastycznych.

W przypadku rozpatrywanego przykładu wprowadzającego należy zdefiniować parametry wstępne tworzonej części (rys. 5): nazwa części: plate_2d (rys. 5: ❹), zagadnienie dwuwymiarowe (rys. 5: ❺), tworzona część będzie wykazywała się odkształceniami pod wpływem przyłożonego obciążenia (rys. 5: ❻), będzie modelem powłokowym (shell) (rys. 5: ❼), natomiast przybliżony obszar, na którym tworzony będzie szkic wynosił będzie 40 mm (rys. 5: ❽). Po definicji wskazanych wyżej opcji należy wybrać przycisk kontynuuj (Continue) (rys. 5: ❾).

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia okna z programu Abaqus, które służą do definicji parametrów tworzonej części. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami, opcje ponumerowano od 1 do 9 (zielony kolor okręgów z numerami).]

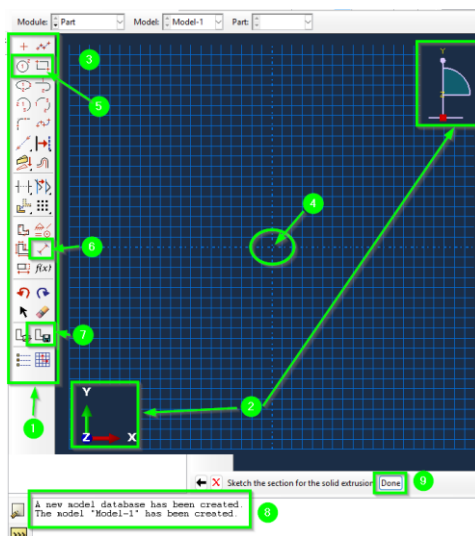




Rys. 5. Opcje programu Abaqus wykorzystywane do definicji parametrów tworzonej części.

Po poprawnym działaniu na ekranie pojawi się szkicownik programu (w module części) jak pokazano na rysunku 6. Na tym etapie należy wykonać szkic elementu, który ma zostać poddany symulacjom obciążenia. Do najważniejszych opcji, które wykorzystywane są podczas szkicowania należą: narzędzia szkicownika (rys. 6: ❶), triady układu odniesienia (bezpośrednio na obszarze szkicownika oraz w prawym górnym rogu programu (rys. 6: ❷)), zakreślony obszar, na którym wykonywany będzie szkic elementu (rys. 6: ❸) z zaznaczonym przecięciem osi obszaru, wskazującym na punkt $X=0$, $Y=0$ w przyjętym układzie współrzędnych (rys. 6: ❹). Zakreślony obszar na wymiar zgodny z definicją jak na rys. 5: ❸. W przypadku rozpatrywanego modelu tarczy z centralnym otworem z zasobów narzędzi szkicownika należy wykorzystać opcje: utworzenia prostokąta i okręgu (rys. 6: ❺), zwymiarowania poszczególnych elementów szkicu (rys. 6: ❻) oraz zapisu już utworzonego szkicu (rys. 6: ❼) i potwierdzenia ukończenia tego etapu tworzenia modelu (rys. 6: ❾). Na każdym etapie pracy w programie zaleca się obserwację komunikatów znajdujących się w dolnej części programu w tzw. oknie wiadomości (rys. 6: ❽).

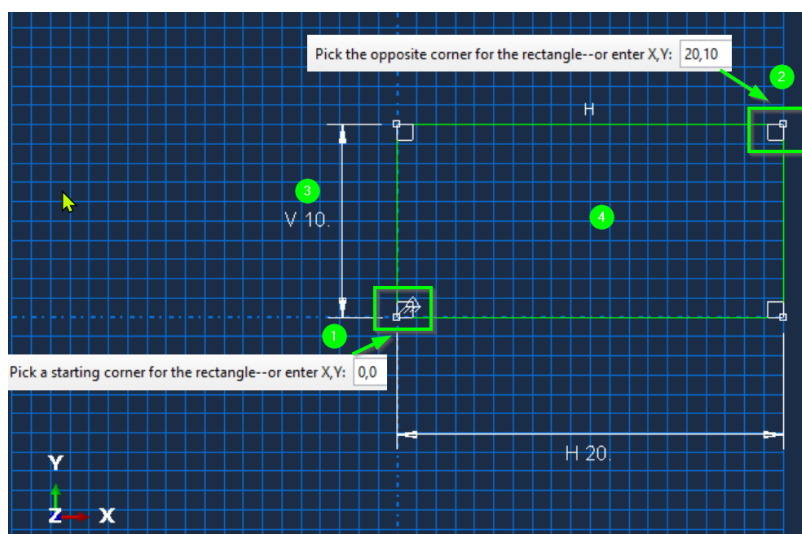
[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia okno szkicownika z programu Abaqus. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami, opcje ponumerowano od 1 do 9 (zielony kolor okręgów z numerami).]



Rys. 6. Widok szkicownika w programie Abaqus.

Należy przystąpić do naszkicowania modelu tarczy z centralnym otworem. W tym celu wybieramy z przybornika narzędzi szkicu prostokąt tworzony z czterech linii (rys. 6: 5). Umieszczenie prostokąta w obszarze szkicu realizowane może być na co najmniej dwa sposoby. Pierwszy sposób zakłada, iż po wyborze prostokąta lewym przyciskiem myszy wskazujemy punkt na obszarze szkicu o współrzędnych $X=0$, $Y=0$ (rys. 7: 1), natomiast przesuwając myszkę drugim kliknięciem lewym przyciskiem myszy tworzymy prostokąt (rys. 7: 2). W takim przypadku utworzenie prostokąta o wymiarach zadanych w poleceniu wymaga zastosowania opcji wymiarowania, gdzie należy zadać właściwe wymiary (rys. 7: 3). Drugą opcję utworzenia prostokąta jest wykorzystanie współrzędnych punktów w poszczególnych liniach. W tym celu należy zdefiniować położenie punktu początkowego ($X=0$, $Y=0$) (rys. 7: 1), oraz punktu po przeciwległej stronie prostokąta (w rozpatrywanym przypadku $X=20$, $Y=10$) (rys. 7: 2)), na tej podstawie program utworzy szkic, można nanieść wymiary. Należy zwrócić uwagę na kolor tworzonego szkicu, kolor linii zielony (rys. 7: 4) wskazuje na całkowitą definicję elementów szkicu, co jest zgodne i wymagane z dobrą praktyką inżynierską pracy z programami typu CAD/CAE.

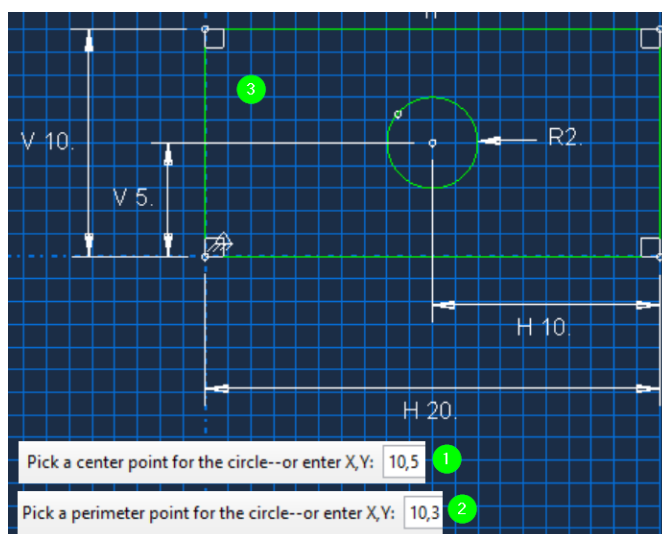
[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia okno szkicownika z programu Abaqus, na którym umieszczony jest tworzony prostokąt. Tło jest koloru granatowego. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami, opcje ponumerowano od 1 do 4 (zielony kolor okręgów z numerami).]



Rys. 7. Definicja szkicu prostokąta w programie Abaqus.

W kolejnym kroku należy do utworzonego wcześniej prostokąta dodać centralny otwór, co będzie realizowane poprzez naszkicowanie okręgu (rys. 6: ❸). Wybieramy okrąg z narzędzi szkicownika i nanosimy go na obszarze szkicu programu. Finalnie za pomocą wymiarowania należy określić wartości: promienia oraz rozmieszczenie okręgu w prostokącie. Tak jak i w przypadku opracowywania prostokąta, tak i okrąg można zbudować wskazując jego współrzędne, wskazując punkt środkowy (rys. 8: ❶) oraz punkt na obwodzie okręgu, wskazujący na jego średnicę (rys. 8: ❷). Po poprawnym działaniu obraz szkicu w programie powinien być jak na rysunku 8: ❸, przy uwzględnieniu całkowitej definicji szkicu.

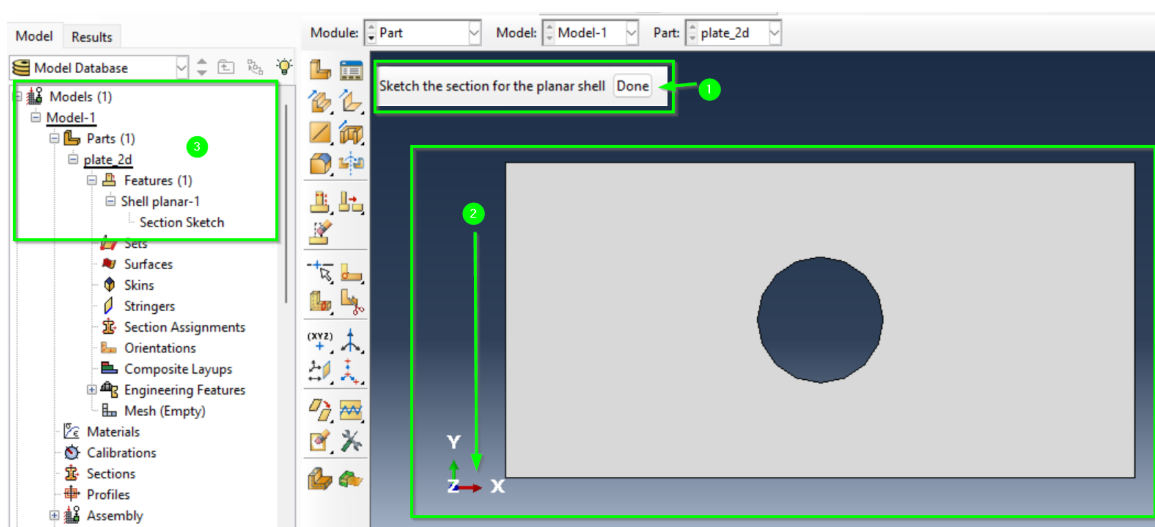
[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia okno szkicownika z programu Abaqus, na którym umieszczony jest prostokąt i dodawany okrąg. Na szkic naniesione są wymiary w kolorze białym. Tło jest koloru granatowego. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami, opcje ponumerowano od 1 do 3 (zielony kolor okręgów z numerami).]



Rys. 8. Definicja szkicu okręgu w programie Abaqus.

Po zakończeniu pracy w szkicu, należy wybrać przycisk Done w dolnej części ekranu (rys. 9: ❶). Skutkować to będzie pojawieniem się na ekranie modelu płaskiej tarczy z centralnym otworem w przyjętym układzie odniesienia, jak na rysunku (rys. 9: ❷). Warto zaobserwować, iż nazwa utworzonej części pojawia się w drzewku opcji programu (rys. 9: ❸). Z tego poziomu istnieje możliwość edycji szkicu na każdym etapie pracy.

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia okno programu Abaqus z utworzonym modelem powłokowym tarczy. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami. Opcje ponumerowano od 1 do 3 (zielony kolor okręgów z numerami).]





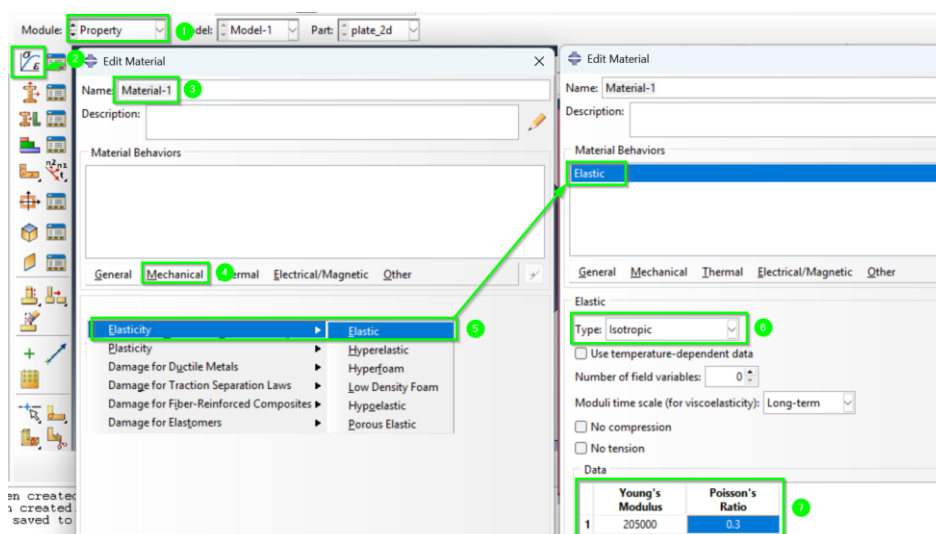
Rys. 9. Widok utworzonego modelu powłokowego tarczy z centralnym otworem.

3.2. Definicja charakterystyki materiałowej i przypisanie jej do przekroju- moduł Property

Programy wykorzystujące MES wymagają, aby zadeklarować charakterystyki wytrzymałościowe materiału, z jakiego wykonana jest rozpatrywana w symulacji część. Podstawą do wyznaczenia charakterystyk wytrzymałościowych i plastyczności materiałów jest realizacja prób jednoosiowego rozciągania w warunkach laboratoryjnych. W wyniku przeprowadzenia testów uzyskuje się charakterystyki takie jak: granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie materiału, moduł Younga, odkształcenia w momencie zerwania (Dzioba et al., 2021). Program Abaqus posiada bardzo bogatą bazę modeli materiałowych, z których Użytkownik może skorzystać. W rozpatrywanym przykładzie tarczy z centralnym otworem założono, iż część będzie charakteryzować się liniowo-sprężystym modelem materiału, z modułem Younga wynoszącym 205000 MPa oraz współczynnikiem Poissona równym 0.3. W celu deklaracji modelu liniowo-sprężystego w zakresie modułu Property (rys. 10: ❶) należy wybrać opcję edytuj materiał (Edit material rys. 10: ❷) z drzewka narzędzi znajdującego się w środkowej części ekranu. Okno (rys. 10: ❸) pozwala na nadanie nazwy definiowanemu materiałowi. Następnie należy przejść do grupy materiałów nazwanych mechanicznymi (rys. 10: ❹) i z pojawiającej się listy wybrać sprężysty (Elasticity) model materiału, następnie opcję Elastic (rys. 10: ❺). W następnym kroku na ekranie programu pojawi się okno, gdzie należy wprowadzić wielkości charakteryzujące materiał w zakresie sprężystym: moduł Younga i współczynnik Poissona. Należy zwrócić uwagę, iż przyjęta nazwa modelu materiałowego jest umieszczona na górze okna, zaś w polu zachowanie materiału (ang. Material behaviors) pojawi się wybrana opcja sprężysty. Możliwy jest wybór charakterystyki materiału, spośród materiałów izotropowych lub anizotropowych (rys. 10: ❻). W części okna oznaczonej jako dane (Data) należy wpisać wartości modułu Younga (205000 MPa) oraz współczynnik Poissona (0.3) (rys. 10: ❼). Po zaakceptowaniu wprowadzonych danych materiał o nazwie Material-1 pojawi się w drzewku opcji programu.

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia okna programu Abaqus z zakresu modułu Property. Sekwencja pokazanych działań ma celu definicję modelu materiałowego w programie. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami. Opcje ponumerowano od 1 do 7 (zielony kolor okręgów z numerami).]

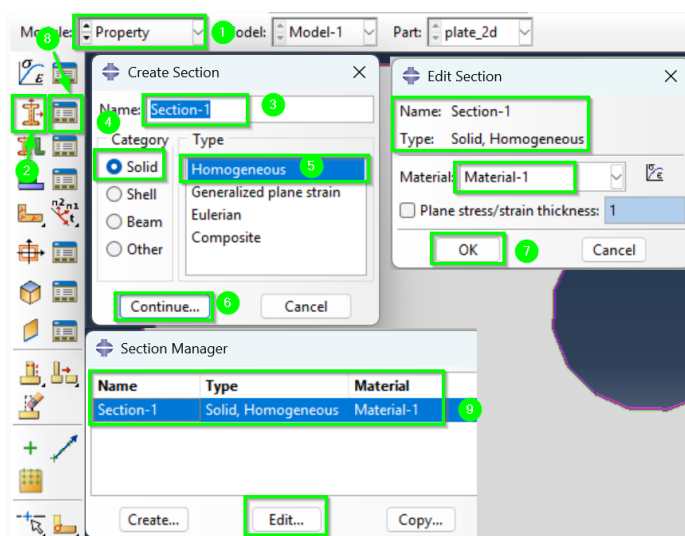




Rys. 10. Zrzuty z ekranu programu przedstawiające definicję modelu materiałowego.

Po definicji modelu materiałowego należy dokonać jego przypisu do tworzonej części. W pierwszym kroku należy zdefiniować nową sekcję w zakresie modułu Property (rys. 11: ❶). W tym celu wybieramy opcję utwórz sekcję z paska narzędzi (rys. 11: ❷) i w pojawiającym się oknie programu definiujemy: nazwę sekcji (rys. 11: ❸), typ sekcji (założenie ciała stałego (rys. 11: ❹)) i typ zachowania się części: jednorodność charakterystyk w całym przekroju (rys. 11: ❺). Po wyborze przycisku kontynuuj na ekranie pojawi się okno, gdzie należy przypisać tworzony wcześniej materiał (Material-1) do aktualnej sekcji. Definiowana sekcja pojawi się w wykazie jak na rys. 11: ❻.

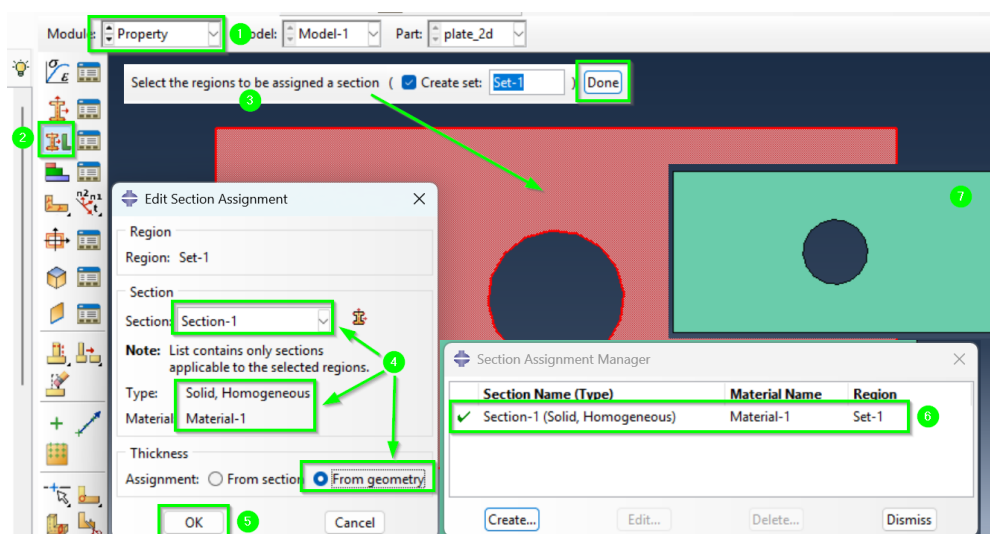
[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia okna programu Abaqus z zakresu modułu Property. Sekwencja pokazanych działań ma celu stworzenie nowej sekcji w programie. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami. Opcje ponumerowano od 1 do 9 (zielony kolor okręgów z numerami).]



Rys. 11. Sekwencja działań w programie w celu definicji nowej sekcji.

Kończącym etapem pracy w module Property (rys. 12: ❶) jest przypisanie utworzonej sekcji do przekroju rozpatrywanej tarczy z otworem. Należy wybrać opcję edytuj przypisanie sekcji (rys. 12: ❷), na tym etapie program wyświetli komunikat o konieczności wskazania przekroju, do którego przypisana będzie dana sekcja (rys. 12: ❸). Należy wskazać model tarczy. Po definicji przekroju na ekranie programu pojawi się okno, w którym należy wybrać sekcję, która będzie przypisywana (rys. 12: ❹) (jest to sekcja tworzona w poprzednim kroku pracy z modelem), natomiast grubość ma być warunkowana geometrią modelu. Wybór wskazanych parametrów należy zaakceptować przyciskiem OK (rys. 12: ❺). Zdefiniowane przypisanie sekcji do przekroju modelu pojawi się w wykazie jak na rys. 12: ❻. Opracowywany model tarczy z centralnym otworem zmieni kolor na odcień zielonego (rys. 12: ❼).

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia screen z programu Abaqus z zakresu modułu Property. Sekwencja pokazanych działań ma na celu przypisanie zdefiniowanej wcześniej sekcji do geometrii tworzonego modelu tarczy. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami. Opcje ponumerowano od 1 do 7 (zielony kolor okręgów z numerami).]

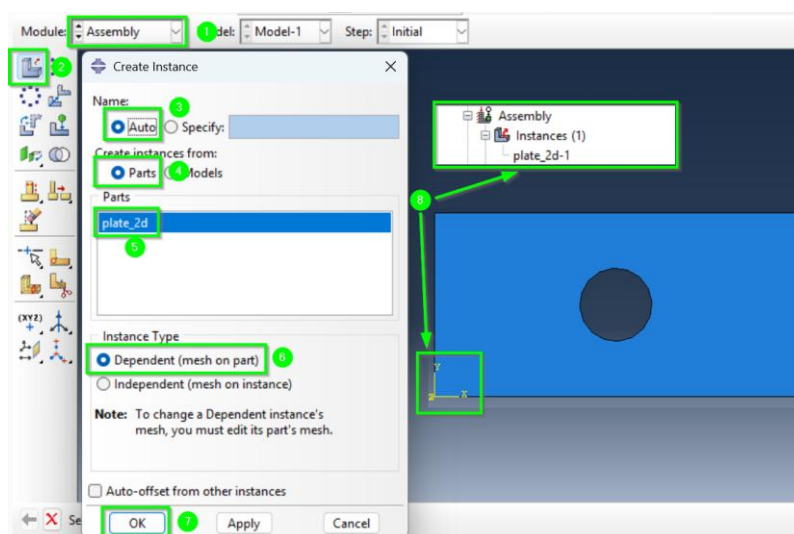


Rys. 12. Widok okien z zakresu modułu Property, z wyszczególnionymi działaniami w celu przypisu sekcji do geometrii modelu.

3.3. Ustalenie rozmieszczenia części tworzących model w przyjętym układzie odniesienia- moduł Assembly

W kolejnym kroku pracy w programie Abaqus należy ustalić położenie analizowanej tarczy w globalnym układzie odniesienia. Służy do tego moduł Assembly (rys. 13: ①). Po wyborze opcji utwórz przypadek (instancję) (rys. 13: ②) na ekranie pojawi się okno z możliwymi danymi do deklaracji: nazwą instancji (domyślną lub dowolną) (rys. 13: ③), źródłem do jakiego tworzona instancja będzie się odnosić (część lub model wraz z nazwą) (rys. 13: ④ ⑤) oraz typem instancji (zależnym- siatka na części, niezależnym- siatka na deklarowanej instancji) (rys. 13: ⑥). Wybór należy zaakceptować przyciskiem OK (rys. 13: ⑦). W prezentowanym przypadku zasadne jest utworzenie instancji na podstawie opracowanej wcześniej części plate_2d, zakładając typ zależny przy tworzeniu siatki ES (rys. 13). Po poprawnym działaniu w prawym dolnym rogu części pojawi się układ współrzędnych (domyślnie w kolorze żółtym), nazwa nowo utworzonej instancji będzie widoczna w drzewku opcji programu (rys. 13: ⑧).

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia screen z programu Abaqus z zakresu modułu Assembly. Sekwencja pokazanych działań ma na celu ustalenie modelu tarczy w globalnym układzie odniesienia. W lewym dolnym rogu modelu widoczny jest układ współrzędnych. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami. Opcje ponumerowano od 1 do 8 (zielony kolor okręgów z numerami).]



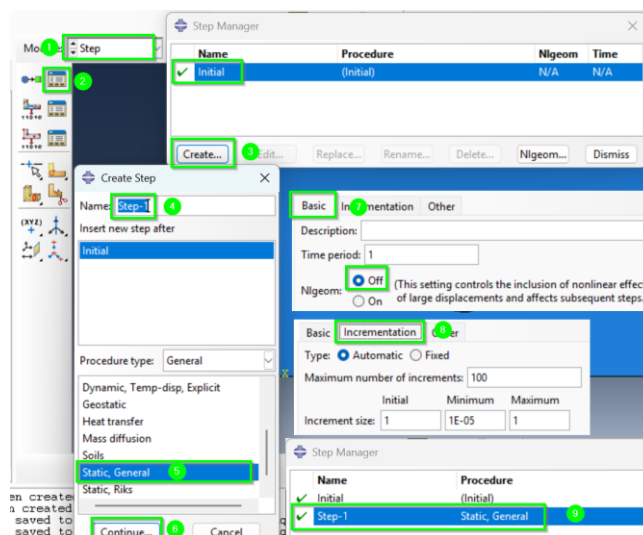
Rys. 13. Ustalenie rozmieszczenia analizowanego modelu w globalnym układzie odniesienia w programie Abaqus.

3.4. Określenie szczegółów obliczeń numerycznych (typ analizy, poszczególne kroki rozwiązania) - moduł Step

Moduł Step (rys. 14: ❶) programu Abaqus służy do definicji rodzaju przeprowadzonej analizy, wraz z jej parametrami obliczeniowymi. Ustawienia należy dostosować do rodzaju rozpatrywanego zagadnienia. W module Step wywołujemy opcję menadżer kroków obliczeniowych (Step Manager) (rys. 14: ❷). W pojawiającym się wówczas oknie programu powinien być widoczny pierwotny krok obliczeniowy, o domyślnej nazwie Initial. Jest to krok automatycznie ustalony przez program, Użytkownik nie ma możliwości jego edycji. Jednakże możliwe jest zadeklarowanie dla tego kroku warunków brzegowych np. umocowań. Czas trwania kroku Initial wynosi 0 s. W celu deklaracji nowego kroku obliczeniowego należy wybrać opcję Create (rys. 14: ❸). Na ekranie pojawi się wówczas okno definicji nowego kroku obliczeniowego. Domyślna nazwa nowego kroku ustalona jest na Step-1 (rys. 14: ❹). Z rodzaju procedur typu General należy wybrać zagadnienie rozpatrywane w danym kroku jako statyczne (rys. 14: ❺). Na tym etapie program Abaqus oferuje dużą liczbę możliwych do deklaracji typów zagadnień. Zaleca się Użytkownikowi zapoznanie z możliwościami programu w tym zakresie. Po wyborze wstępnych parametrów kroku obliczeniowego Step-1 i akceptacji poprzez kliknięcia na ikonę Continue (rys. 14: ❻) program przekierowuje do ustawień szczegółowych definiowanego kroku. Opcja Nlgeom (ang. nonlinear geometry) (rys. 14: ❼) pozwala na określenie, czy w danych obliczeniach numerycznych rozpatrywana będzie nieliniowość geometryczna, jeśli tak opcję Nlgeom należy ustawić w pozycji ON. Jeśli

natomiast rozpatrywane będzie zagadnienie liniowe (tak jak w przypadku modelu tarczy w niniejszym przykładzie) trzeba pozostawić opcję Nlgeom z ustawieniem OFF. Z punktu widzenia pracy solvera ważnymi ustawieniami kroku obliczeniowego są szczegóły odnoszące się do jego inkrementacji (przyrostu) czasu. Należy zdefiniować maksymalną liczbę inkrementacji oraz rozmiar przyrostu: na starcie analiz, wartość minimalną i maksymalną. W ramach niniejszego przykładu definiujemy parametry inkrementacji jak pokazano na rys. 14: ⑧. Po poprawnym działaniu nowo definiowany krok obliczeń o nazwie Step-1 pojawi się w menadżerze kroków obliczeniowych (rys. 14: ⑨).

[Tekst alternatywny. Rysunek prezentuje obrazy z programu Abaqus z zakresu modułu Step. Sekwencja pokazanych działań ma na celu ustalenie typu oraz parametrów kroku obliczeniowego Step-1. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami, opcje ponumerowano od 1 do 9 (zielony kolor okręgów z numerami).]



Rys. 14. Szczegóły definicji kroku obliczeniowego Step-1 w programie Abaqus.

3.5. Definicja warunków brzegowych modelu: działających obciążeń i występujących umocowań- moduł Load

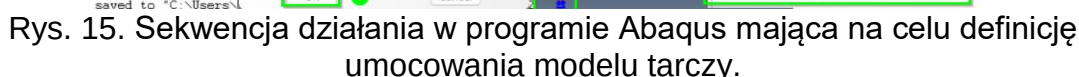
Warunki brzegowe które zostają zaimplementowane do modelu numerycznego definiowane są w module Load programu (rys. 15: ①). Abaqus oferuje szeroką paletę możliwości deklaracji umocowań i obciążeń oddziałujących na model. W rozpatrywanym zadaniu płaskiej tarczy z centralnym otworem, po jednej stronie elementu krawędź jest zamocowana, natomiast po stronie przeciwległej do krawędzi tarczy przyłożone jest obciążenie w postaci ciśnienia o wartości 12 MPa. W celu



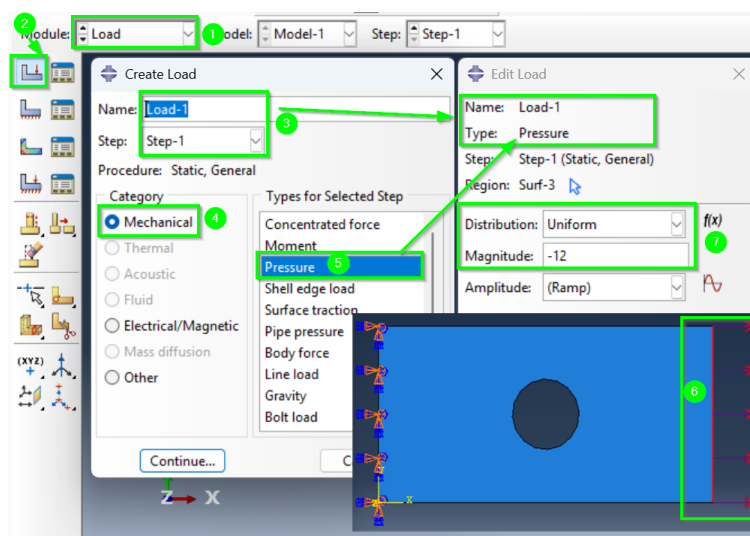
deklaracji umocowania krawędzi modelu należy w module Load wywołać menadżer warunków brzegowych (rys. 15: ❷). Okno na początku pracy jest puste, rozpoczynamy definicję umocowania poprzez wybór opcji Create (rys. 15: ❸). Pojawi się na ekranie okno definicji warunków brzegowych. Należy określić nazwę tworzonego warunku (domyślnie jest to BC-1) oraz krok obliczeniowy, w którym dany warunek brzegowy będzie realizowany. Jak już przedstawiono w niniejszym opracowaniu, umocowanie wstępne modelu tarczy realizowane będzie w kroku Initial (rys. 15: ❹). Następnie deklarowana jest kategoria do jakiej klasyfikuje się zagadnienie (w tym przypadku zagadnienie mechaniczne) i typ warunku brzegowego (rys. 15: ❺). Program oferuje rozbudowaną bazę typów stosowanych warunków brzegowych. W zagadnieniu tarczy umocowanie deklarowane będzie jako typ symetrii/antysymetrii/wymuszenia. Po wyborze typu warunku brzegowego program poprosi o wskazanie miejsca na modelu, gdzie zamocowanie będzie przyłożone. Wskazujemy lewą krawędź tarczy (rys. 15: ❻). Następnie na ekranie pojawi się okno z możliwymi do wyboru wymuszeniami oddziaływującymi na analizowany model. W oknie tym oznaczenia U1, U2 oraz U3 to przemieszczenia zgodnie z przyjętym układem współrzędnych. Liczba 1 oznacza oś x, liczba 2 oś y, zaś liczba 3 oś z. Oznaczenia UR odnoszą się do obrotu (rotacji) elementu, podobnie jak przemieszczenia w odniesieniu do konkretnej osi układu współrzędnych. W rozpatrywanym przykładzie do krawędzi tarczy przyłożone jest umocowanie ENCASTRE, polegające na zablokowaniu możliwości przemieszczeń oraz rotacji, zgodnie z rys. 15: ❼. Wybór akceptujemy przyciskiem OK (rys. 15: ❽). Przy poprawnym działaniu Użytkownika zadeklarowany warunek BC-1 pojawi się w menadżerze warunków brzegowych (rys. 15: ❾), na krawędzi w modelu tarczy będą widoczne charakterystyczne dla programu Abaqus strzałki.

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia screen z programu Abaqus z zakresu modułu Load. Sekwencja pokazanych działań ma na celu zdefiniowanie umocowania modelu. W dolnej części rysunku widoczny jest model tarczy ze strzałkami wskazującymi na umocowanie jego lewej krawędzi. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami. Opcje ponumerowano od 1 do 9 (zielony kolor okręgów z numerami).]





[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia screen z programu Abaqus z zakresu modułu Load. Sekwencja pokazanych działań ma na celu zdefiniowanie obciążenia modelu. W dolnej części rysunku widoczny jest model tarczy ze strzałkami wskazującymi na umocowanie jego lewej krawędzi oraz przyłożone obciążenie na krawędź po prawej stronie. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami. Opcje ponumerowano od 1 do 7 (zielony kolor okręgów z numerami).]



Rys. 16. Kolejność działań przy definicji obciążenia w postaci ciśnienie w programie Abaqus.

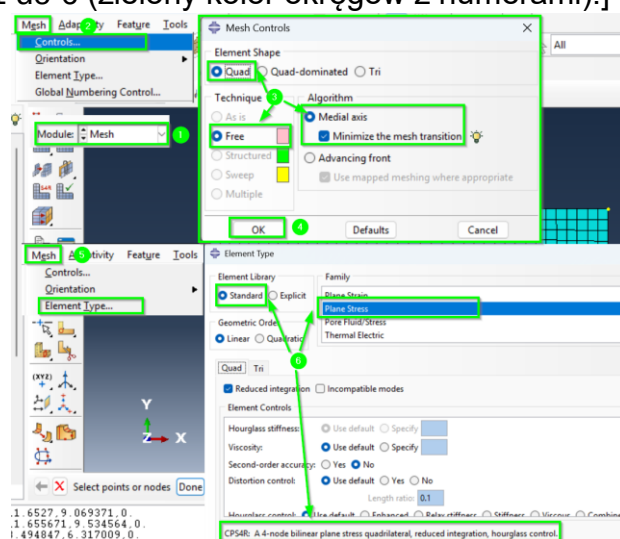
3.6. Opracowanie siatki elementów skończonych (ES)- moduł Mesh

Niezwykle ważnym krokiem w procedurze opracowania modelu numerycznego jest prawidłowe przeprowadzenie procesu dyskretyzacji tj. naniesienia siatki elementów skończonych (ES) na geometrię modelu. W znacznym stopniu poprawność uzyskanych wyników obliczeń warunkowana jest jakością opracowanej siatki. Rozwiązanie niniejszego przykładu prezentowane jest w wersji edukacyjnej oprogramowania Abaqus. Charakteryzuje się ona ograniczeniem, w postaci budowy siatki elementów skończonych do 1000 węzłów. Dlatego siatka ES w prezentowanym przykładzie będzie się mieściła w narzuconej liczbie węzłów. W wersji komercyjnej programu Abaqus ograniczenie to nie występuje. Praca z siatką ES realizowana jest w programie w module Mesh (rys. 17: ❶). W pierwszym etapie procedury dyskretyzacji należy określić preferowany kształt stosowanych elementów skończonych. W tym celu z górnego paska menu należy z grupy Mesh wybrać opcję Controls (rys. 17: ❷). Wówczas na ekranie pojawi się okno wyboru poszczególnych kształtów elementów skończonych. Należy z grupy kwadratowych ES wybrać jedynie dostępną w przypadku geometrii modelu tarczy dowolną technikę budowy siatki ES, z aktywną opcją Medial axis (rys. 17: ❸). Wybór akceptujemy przyciskiem OK (rys. 17: ❹).

W kolejnym kroku należy zdefiniować typ stosowanych elementów skończonych. Opcja ta jest dostępna poprzez górne menu, grupę Mesh a następnie Element Type

(rys. 17: ⑤). W pojawiającym się oknie programu możliwy jest wybór i definicja poszczególnych typów ES i ich parametrów. Korzystając z zasobów obliczeniowych Abaqus/Standard wybierana jest opcja Geometrical Order. Opcja ta odnosi się do zasad interpolacji stosowanych do opisu kształtu i pola przemieszczeń w elementach skończonych. W rozpatrywanym przykładzie geometria modelu predysponuje do zastosowania analizy przy założeniu dominacji płaskiego stanu naprężenia, stąd opcja Plane stress zostaje wybrana z zakresu okna Family (typu przeprowadzonej analizy). Oznaczenie stosowanych elementów skończonych z charakterystycznym dla programu Abaqus kodem (CPS4R) widnieje na dole okna programu (rys. 17: ⑥).

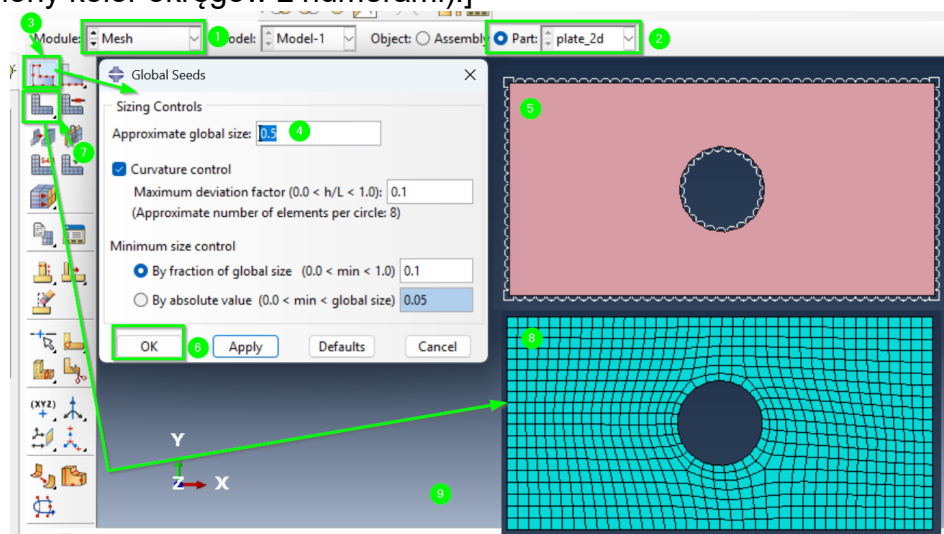
[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia screen z programu Abaqus z zakresu modułu Mesh. Na rysunku widoczne są poszczególne okna z programu Abaqus, w zakresie których definiowane są szczegóły siatki elementów skończonych: kształt oraz parametry. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami, opcje ponumerowano od 1 do 6 (zielony kolor okręgów z numerami).]



Rys. 17. Etapy definicji siatki elementów skończonych w oprogramowaniu Abaqus.

W celu utworzenia siatki na modelu należy zdefiniować rozmiar elementów skończonych (opcja Global Seeds) (rys. 18: ③). W rozpatrywanym przypadku modelu tarczy rozmiar ES ustala się na 0.5 mm (rys. 18: ④), następnie należy wskazać obszar, na którym wykonana będzie dyskretyzacja (rys. 18: ⑤), wybór zaakceptować przyciskiem OK (rys. 18: ⑥). Wybór opcji utworzenia siatki (rys. 18: ⑦) powoduje nałożenie na model opracowanej siatki i zmianę widoku modelu w programie, jak na rys. 18: ⑧.

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia screen z programu Abaqus z zakresu modułu Mesh. Na rysunku widoczne są poszczególne okna z programu Abaqus, w których określany jest rozmiar elementów skończonych. W prawym dolnym rogu rysunku pokazano widok modelu tarczy w kolorze niebieskim, z naniesioną siatką ES. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami, opcje ponumerowano od 1 do 8 (zielony kolor okręgów z numerami).]



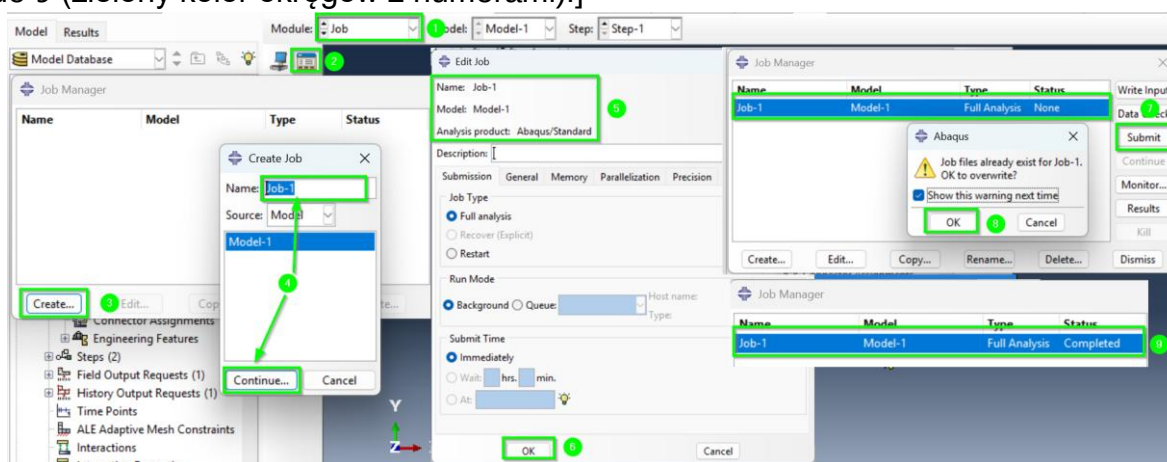
Rys. 18. Etapy definicji rozmiaru elementów skończonych wraz z widokiem siatki naniesionej na model tarczy.

3.7. Przygotowania obliczeń numerycznych i ich inicjacja- moduł Job

Uruchomienie obliczeń numerycznych w programie Abaqus realizowane jest w module Job (rys. 19: ❶). Należy wybrać opcję menadżera obliczeń (pracy) (rys. 19: ❷) i poprzez przycisk Create (rys. 19: ❸) wywołać kreator tworzenia nowego zadania obliczeniowego. W kreatorze definiujemy nowe zadanie z domyślną nazwą Job-1 i wybieramy Continue (rys. 19: ❹). Na ekranie pojawi się wówczas okno edycji zdania obliczeniowego, z adnotacją o nazwie zadania (Job-1) i środowisku wykorzystywanym do rozwiązania (rys. 19: ❺). Na tym etapie pracy nie będzie ono zmieniane, wybieramy OK (rys. 19: ❻). Wówczas w menadżerze obliczeń (pracy) pojawi się nowa pozycja Job-1. Pozostało jeszcze zlecić programowi Abaqus start obliczeń numerycznych poprzez opcję Submit (rys. 19: ❼) (z potwierdzeniem uruchomienia obliczeń w pojawiającym się oknie jak na rys. 19: ❽). Po poprawnym działaniu Użytkownika oraz realizacji obliczeń przez solver programu przy zadaniu

obliczeniowym Job-1 pojawi się adnotacja o jego kompletności (rys. 19: 9). Obliczenia numeryczne zostały poprawnie wykonane.

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia screen z programu Abaqus z zakresu modułu Job. Na rysunku widoczne są poszczególne okna z programu Abaqus, w których pokazano sekwencję postępowania w celu startu obliczeń numerycznych. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami, opcje ponumerowano od 1 do 9 (zielony kolor okręgów z numerami).]

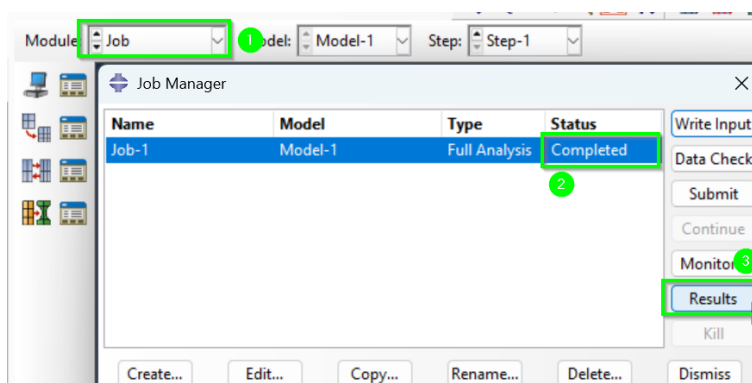


Rys. 19. Procedura uruchomienia obliczeń numerycznych w środowisku Abaqus.

3.8. Przegląd wyników obliczeń- moduł Visualization

Rezultaty obliczeń numerycznych w programie Abaqus dostępne są w dodatku Visualization. Można do niego przejść z modułu Job (rys. 20: 1) i menadżera obliczeń (pracy). Przy kompletnych obliczeniach numerycznych (jak na rys. 20: 2) należy wybrać opcję Wyników (rys. 20: 3). Wówczas przekieruje Użytkownika do modułu Visualization.

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia screen z programu Abaqus z zakresu modułu Job. Na rysunku widoczne jest okno menadżera obliczeń, z adnotacją o kompletności obliczeń o nazwie Job-1. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami, opcje ponumerowano od 1 do 3 (zielony kolor okręgów z numerami).]



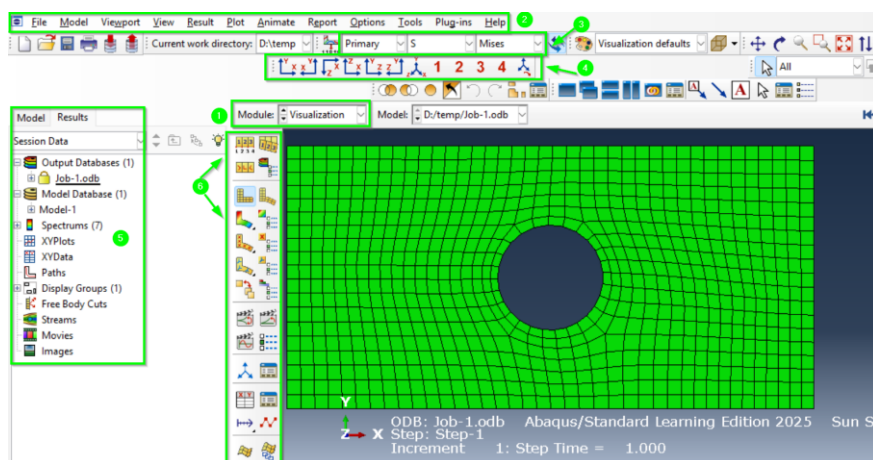
Rys. 20. Widok menadżera obliczeń z kompletnymi wynikami dla Job-1.

W module wizualizacji (rys. 21: ❶) oprogramowania Abaqus należy zwrócić uwagę na poszczególne opcje:

- 1) Górny pasek narzędzi z mnogością opcji do analizy i prezentacji wyników (rys. 21: ❷).
- 2) Okna wyboru typu wyświetlanych wielkości (naprężeń, odkształceń, przemieszczeń itp.) (rys. 21: ❸).
- 3) Paletę dostępnych widoków opracowywanego modelu (rys. 21: ❹).
- 4) Drzewko opcji programu, skąd jest dogodna możliwość definicji i edycji poszczególnych sposobów prezentacji wyników (rys. 21: ❺).
- 5) Okno z narzędziami służącymi do prezentacji uzyskanych wyników obliczeń (możliwości w wielu przypadkach tożsame z drzewkiem opcji po lewej stronie ekranu) (rys. 21: ❻).

Program Abaqus oferuje szerokie możliwości analizy i prezentacji uzyskanych wyników obliczeń. Zachęcam Użytkownika do zgłębienia dostępnych opcji programu.

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia screen z programu Abaqus z zakresu modułu Visualization. W centralnej części rysunku widoczny jest model tarczy (kolor zielony) z naniesioną siatką elementów skończonych. Poszczególne opcje, które są ważne z punktu widzenia pracy w programie obrysowano prostokątami wykonanymi zielonymi liniami, opcje ponumerowano od 1 do 6 (zielony kolor okręgów z numerami).]

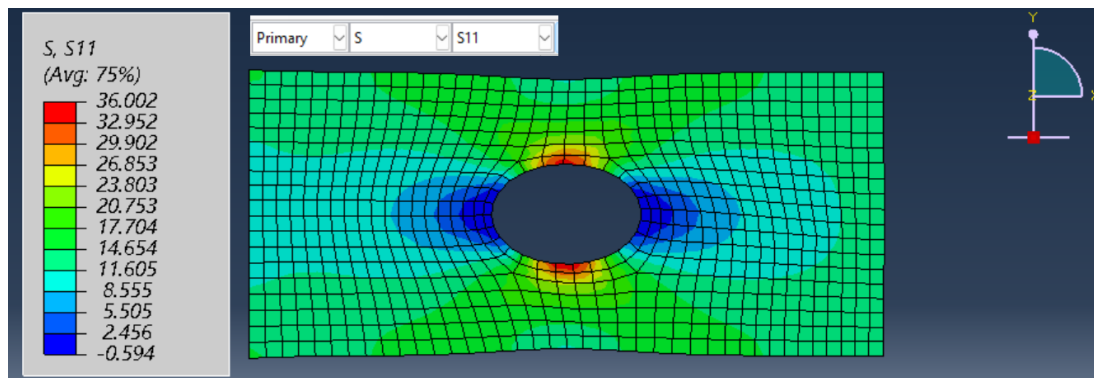


Rys. 21. Najważniejsze opcje modułu Visualization programu Abaqus.

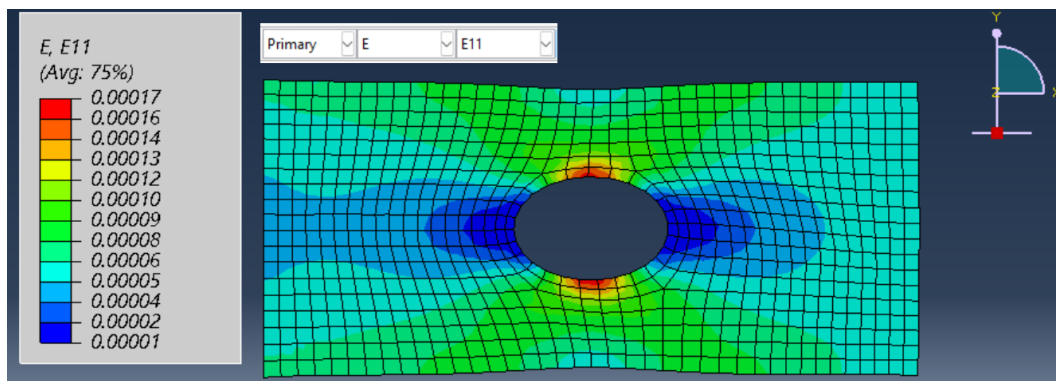
W ramach rozpatrywanego przykładu tarczy z centralnym otworem rozciąganej ciśnieniem wynikiem pracy będzie wyświetlenie map naprężeń oraz odkształceń w modelu. Ograniczymy się do składowych działających w kierunku przyłożonego obciążenia, tj. naprężenia σ_{11} oraz odkształcenia ϵ_{11} . W celu wyświetlenia na ekranie wymaganych wielkości należy skorzystać z okna wyboru typu wyświetlanych wielkości (rys. 21: ③). W opcjach tych wskazać wielkości: S11 oraz E11. Przy poprawnym działaniu widok map naprężeń i odkształceń oraz ich wartości powinny być jak na rysunku 22.

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia screen z programu Abaqus z zakresu modułu Visualization. Na rysunku oznaczonym jako a) pokazane są wartości oraz mapy naprężeń σ_{11} . Legenda stopniuje wartości naprężeń od najniższych, gdzie przypisuje im kolory niebieskie, poprzez kolory: zielony, żółty, pomarańczowy do czerwonego dla najwyższych wartości. Mapy naprężeń są naniesione na model tarczy. Taka sama zasada oznaczenia map stosowana jest dla odkształceń ϵ_{11} , widocznych na rysunku b).]

a)



b)

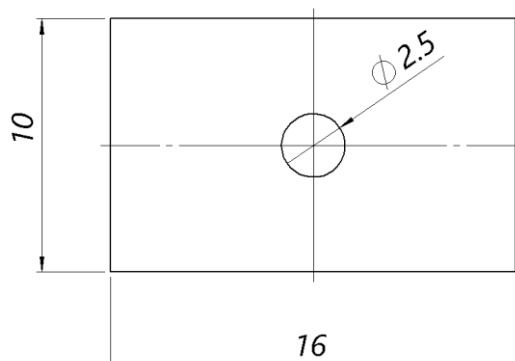


Rys. 21. Rezultaty symulacji numerycznych modelu tarczy z otworem, wartości oraz mapy: a) naprężeń σ_{11} , b) odkształceń ϵ_{11} .

4. Przykład do samodzielnej realizacji

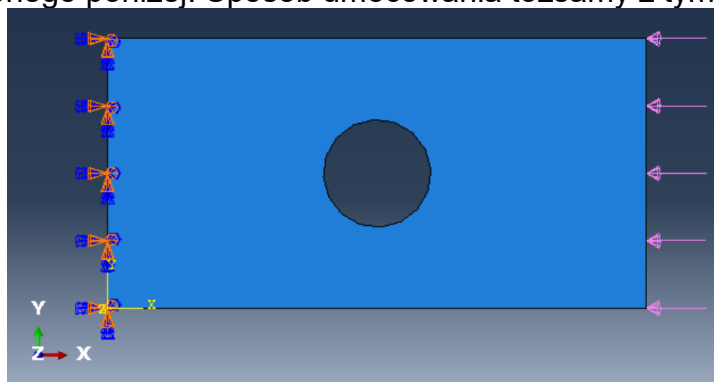
W ramach samodzielnej pracy w programie Abaqus zaleca się edycję przedstawionego wcześniej przykładu, w celu realizacji (aktualizacji) następujących założeń:

1) Model ma mieć wymiary jak na schemacie:



2) Charakterystyki materiałowe modelu tarczy: $E = 201000 \text{ MPa}$, $\nu = 0.28$.

3) Na model tarczy działa ciśnienie (wartość 14 MPa) według schematu przedstawionego poniżej. Sposób umocowania tożsamy z tym z przykładu.



4) Wyświetlić rozkłady (mapy): naprężeń zredukowanych (Mises) i maksymalnych odkształceń głównych.

Pozostałe ustawienia i parametry modelu pozostają jak w prezentowany przykładzie w rozdziale 3 niniejszego opracowania.

5. Literatura

- Chróścielewski, J., Burzyński, S., Daszkiewicz, K., Sobczyk, B., & Witkowski, W. (2014). *Wprowadzenie do modelowania MES w programie ABAQUS: materiały pomocnicze do laboratorium z Metody Elementów Skończonych*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- Dzioba, I., Lipiec, S., Pala, R., & Furmańczyk, P. (2021). On Characteristics of Ferritic Steel Determined during the Uniaxial Tensile Test. *Materials*, 14(11), 3117. doi: 10.3390/ma14113117
- Lee, B. (2019). *ABAQUS for Engineers*. Florida: BW Publications.



- Skrzat, A. (2014). *Modelowanie liniowych i nieliniowych problemów mechaniki ciała stałego i przepływów ciepła w programie ABAQUS*. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- Szturomski, B. (2013). *Inżynierskie zastosowanie MES w problemach mechaniki ciała stałego: na przykładzie programu Abaqus*. Gdynia: Wydawnictwo Akademickie AMW.
- ABAQUS 6.12. (2020). *ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.12*. Dassault Systèmes Simulia Corp. Retrieved from <http://130.149.89.49:2080/v6.12/index.html>.
- *Abaqus 2016 Documentation*. (2025). Retrieved from <http://130.149.89.49:2080/v2016/index.html>.

