



UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN
The Faculty of Technical Sciences
POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11
tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55
URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)



Obliczeniowa Dynamika Płynów

Computational Fluid Dynamics – CFD

Siatki Numeryczne
(wersja skrócona)

wersja: 5 lutego 2026

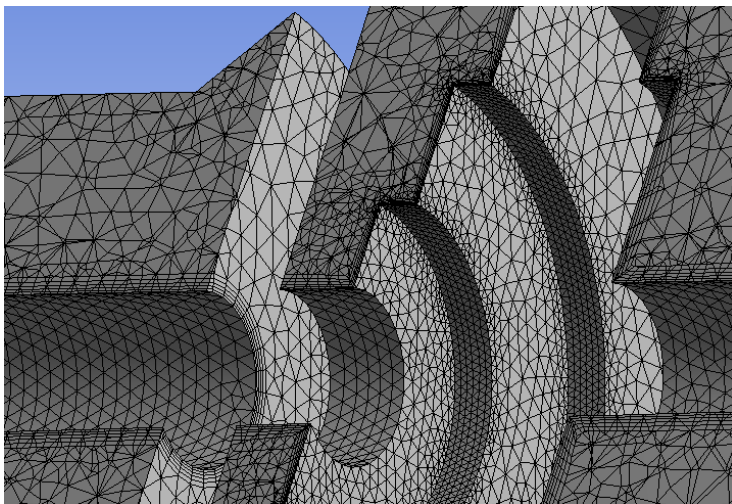
Wojciech Sobieski

Olsztyn, 2003-2026

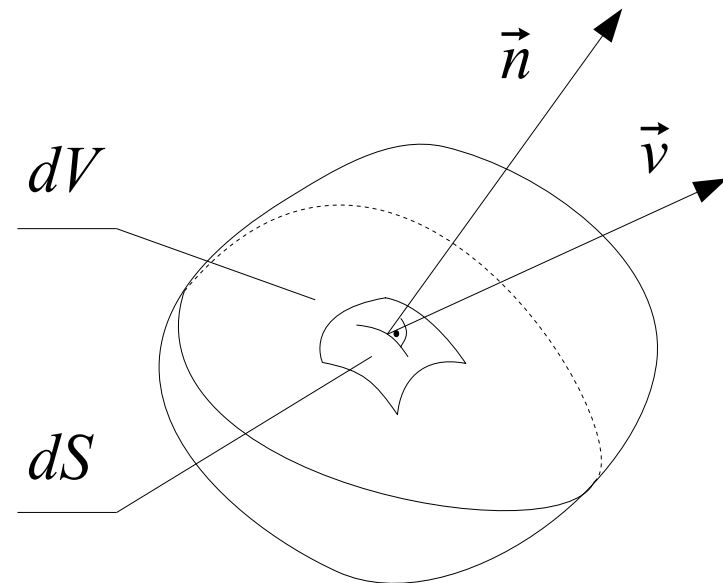
Dyskretyzacja

Dyskretyzacja – zamiana funkcji ciągłej na funkcję określoną jedynie w wybranym zbiorze argumentów.

W metodach numerycznych dyskretyzacji podlega przestrzeń oraz czas.



Przykład dyskretyzacji
przestrzeni obliczeniowej.

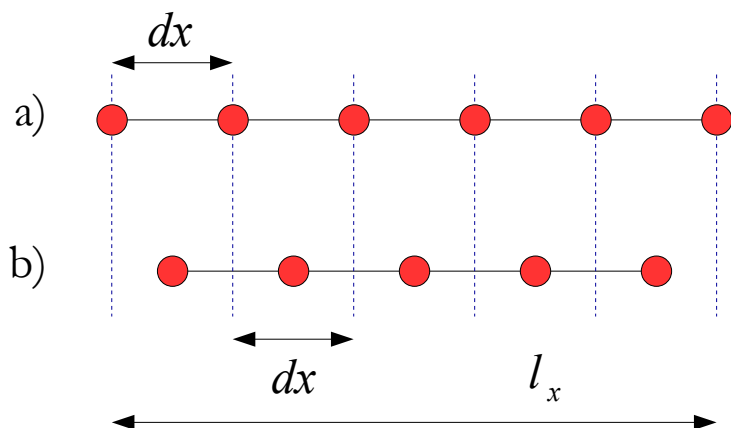
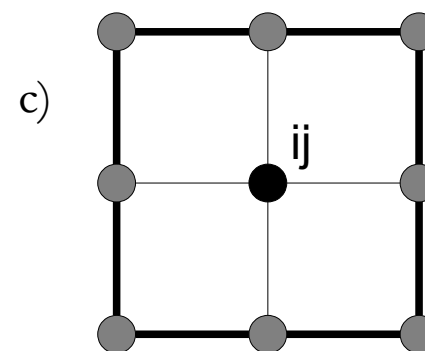
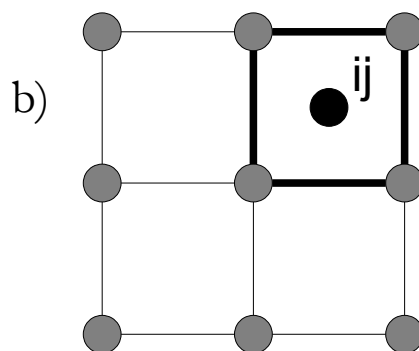
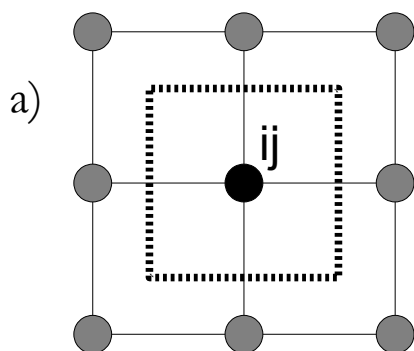


Schemat Objętości Skończonej.

Rodzaje dyskretyzacji przestrzeni

Rodzaje dyskretyzacji przestrzeni:

- a) centralna względem węzła (node-cell scheme) – typowa dla MRS oraz MES,
- b) centralna względem komórki (cell centered scheme) – typowa dla MOS, MZB,
- c) wielokomórkowa (cell-vertex scheme).



$$dx = \frac{l_x}{n_x - 1}$$

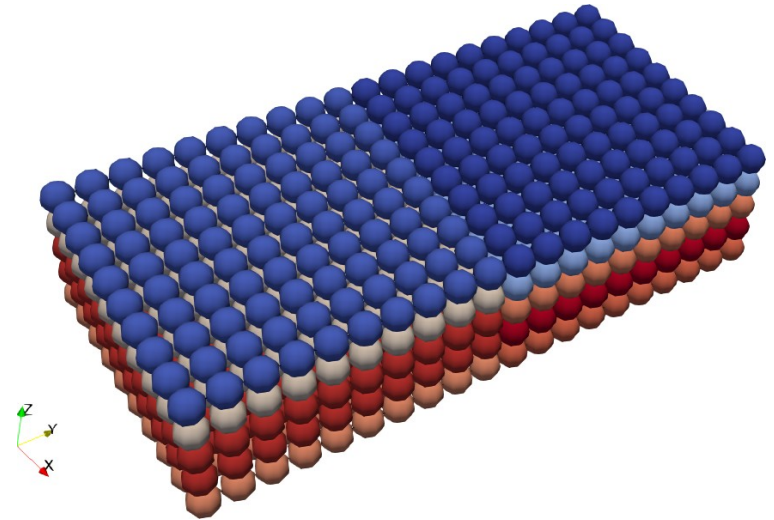
- komórek jest mniej niż węzłów

$$dx = \frac{l_x}{n_x}$$

- komórek jest tyle samo co węzłów

Rodzaje siatek wg standardu VTK

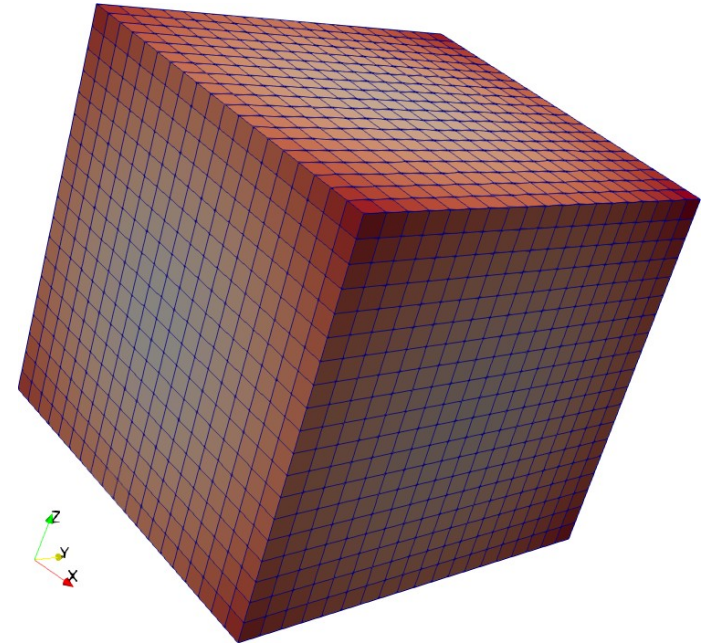
```
!tworzenie pliku VTK:
open(1,file='structured_points_s3d.vtk')
write(1,'(A)')           '# vtk DataFile Version 3.0'
write(1,'(A)')           'Dowolna Nazwa'
write(1,'(A)')           'ASCII'
write(1,'(A)')           'DATASET STRUCTURED_POINTS'
write(1,'(A,3I6)')       'DIMENSIONS ',nx, ny, nz
write(1,'(A,3I6)')       'SPACING 1 1 1'
write(1,'(A,3I6)')       'ORIGIN 0 0 0'
write(1,'(A,I12,A)')     'POINT_DATA ', nx*ny*nz
write(1,'(A)')           'SCALARS skalar_3d float'
write(1,'(A)')           'LOOKUP_TABLE default'
do i = 1, nx
  do j = 1, ny
    do k = 1, nz
      write(1,'(F12.6)')  s3d(i,j,k)
    end do
  end do
end do
close(1)
```



Structured Points – siatka regularnie rozmieszczonych węzłów.

Rodzaje siatek wg standardu VTK

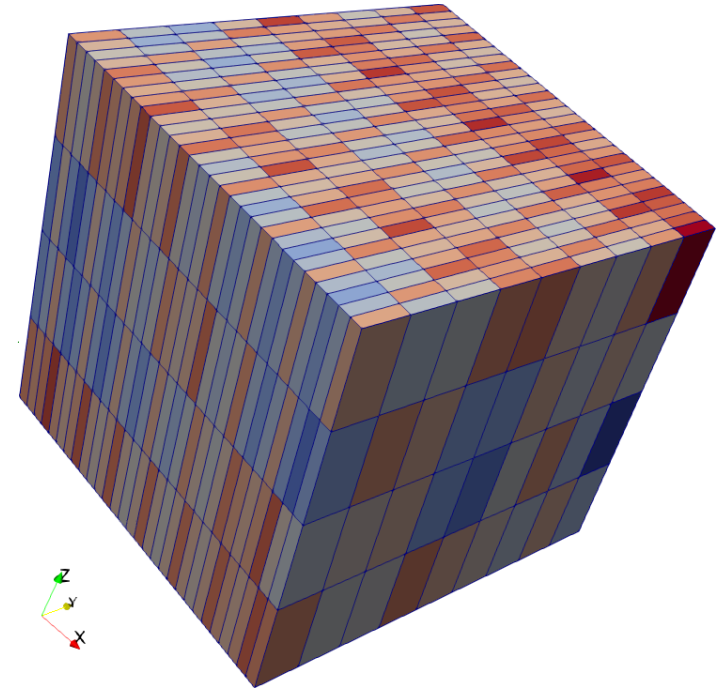
```
!tworzenie pliku VTK:
open(1,file='structured_grid_s3d.vtk')
write(1,'(A)')          '# vtk DataFile Version 3.0'
write(1,'(A)')          'Dowolna Nazwa'
write(1,'(A)')          'ASCII'
write(1,'(A)')          'DATASET STRUCTURED_GRID'
write(1,'(A,3I6)')      'DIMENSIONS ',nx, ny, nz
write(1,'(A,I8,A)')     'POINTS ', nx*nz*ny, ' float'
do i = 1, nx
  do j = 1, ny
    do k = 1, nz
      write(1,'(3F12.6)') i*dx, j*dy, k*dz
    end do
  end do
end do
write(1,'(A,I8)')      'CELL_DATA ', (nx-1)*(ny-1)*(nz-1)
write(1,'(A)')         'SCALARS skalar_3d float'
write(1,'(A)')         'LOOKUP_TABLE default'
do i = 1, nx-1
  do j = 1, ny-1
    do k = 1, nz-1
      write(1,'(F12.6)')      s3d(i,j,k)
    end do
  end do
end do
close(1)
```



Structured Grid – siatka regularnie rozmieszczonych komórek.

Rodzaje siatek wg standardu VTK

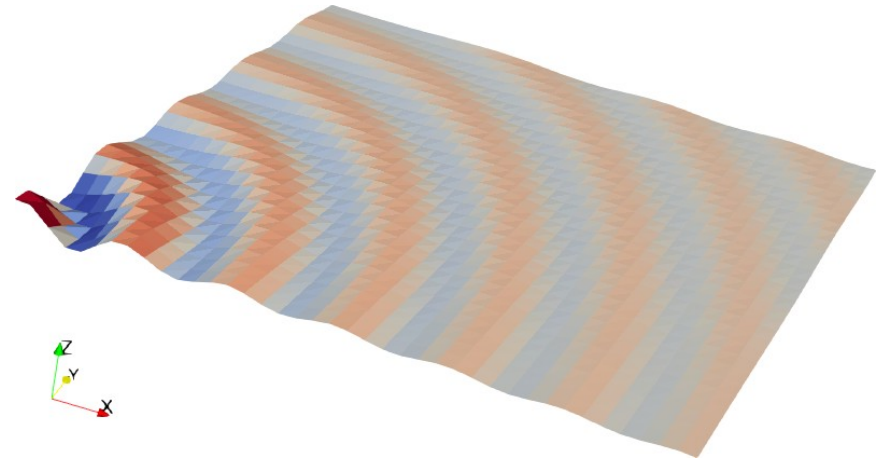
```
!tworzenie pliku VTK:
open(1,file='rectilinear_grid.vtk')
write(1,'(A)')      '# vtk DataFile Version 3.0'
write(1,'(A)')      'Dowolna Nazwa'
write(1,'(A)')      'ASCII'
write(1,'(A)')      'DATASET RECTILINEAR_GRID'
!definicja ile ma byc rzędów punktów na każdym kierunku
write(1,'(A,3I6)')  'DIMENSIONS ',nx, ny, nz
!zapis współrzędnych rzędów punktów:
write(1,'(A,I6,A)') 'X_COORDINATES ', nx, ' float'
write(1,'(F12.5)')  x
write(1,'(A,I6,A)') 'Y_COORDINATES ', ny, ' float'
write(1,'(F12.5)')  y
write(1,'(A,I6,A)') 'Z_COORDINATES ', nz, ' float'
write(1,'(F12.5)')  z
!informacja ile jest komórek w sieci:
write(1,'(A,I6)')   'CELL_DATA ', (nx-1)*(ny-1)*(nz-1)
!informacja ile jest pól skalarnych w pliku (tu 1):
write(1,'(A)')      'FIELD FieldData 1'
!zapis pierwszego pola skalarnego dla wszystkich komórek:
write(1,'(A,I2,I6,A)') 'scalar_3d ', 1, (nx-1)*(ny-1)*(nz-1), ' float '
do i = 1, nx-1
  do j = 1, ny-1
    do k = 1, nz-1
      write(1,'(F12.6)') s3d(i,j,k)
    end do
  end do
end do
close(1)
```



Rectilinear Grid – siatka komórek o różnych rozmiarach na każdym kierunku.

Rodzaje siatek wg standardu VTK

```
!saving the input data in VTK format for ParaView:
open(1,file='unstructured_grid_surface.vtk')
write(1,'(A)') '# vtk DataFile Version 3.0'
write(1,'(A)') 'Surface'
write(1,'(A)') 'ASCII'
write(1,'(A)') 'DATASET UNSTRUCTURED_GRID'
write(1,'(A,I6,A)') 'POINTS ', nx*ny, ' double'
do i = 1, nx
  do j = 1, ny
    write(1,'(3F16.8)') x(i),y(j), z(i,j)
  end do
end do
write(1,'(A,I6,A,I6)') 'CELLS ', (nx-1)*(ny-1), ' ', 5*(nx-1)*(ny-1)
do i = 1, nx-1
  do j = 1, ny-1
    write(1,'(A2,4I8)') '4 ', (i-1)*ny+j-1, (i)*ny+(j-1), (i-1)*ny+1+j-1, (i)*ny+1+(j-1)
  end do
end do
write(1,'(A,I6)') 'CELL_TYPES ', (nx-1)*(ny-1)
do i = 1, nx-1
  do j = 1, ny-1
    write(1,'(A2)') '8 '
  end do
end do
write(1,'(A,I6)') 'CELL_DATA ', (nx-1)*(ny-1)
write(1,'(A)') 'SCALARS z(x,y) double'
write(1,'(A)') 'LOOKUP_TABLE default'
do i = 1, nx-1
  do j = 1, ny-1
    write(1,'(F16.8)') z(i,j)
  end do
end do
close(1)
```



Unstructured Grid – siatka składająca się z dowolnego zestawu dowolnych komórek.

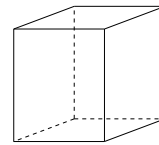
Rodzaje siatek numerycznych

Podstawowa klasyfikacja siatek numerycznych:

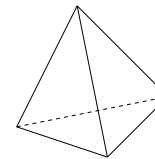
- siatki strukturalne,
- siatki niestukturalne,
- siatki hybrydowe,
- siatki wieloblokowe,
- siatki wielostrefowe,
- siatki nakładające się,
- siatki adaptujące się,
- siatki ruchome,
- ...

Istnieją algorytmy typu:

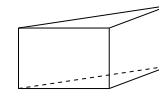
- patch conforming – generacja następuje od powierzchni do wnętrza (zalecane)
- patch independent – generacja następuje od wnętrza do powierzchni



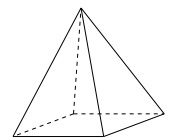
hexa



tetra



prism



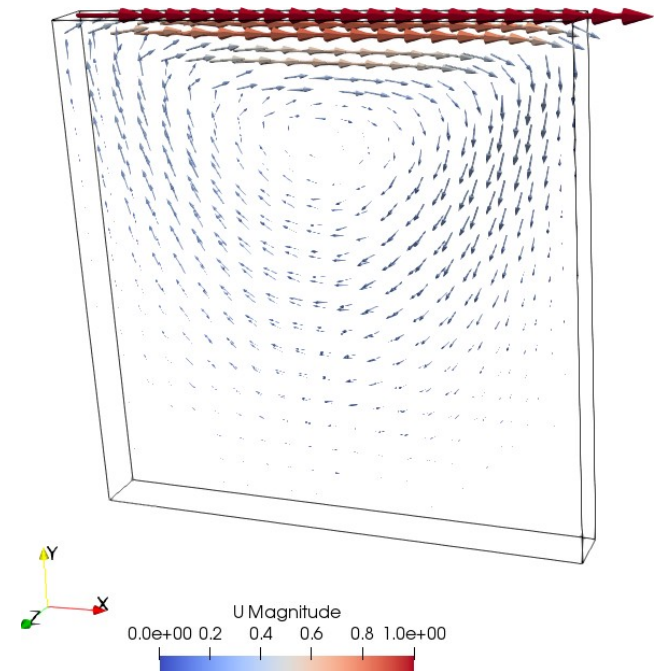
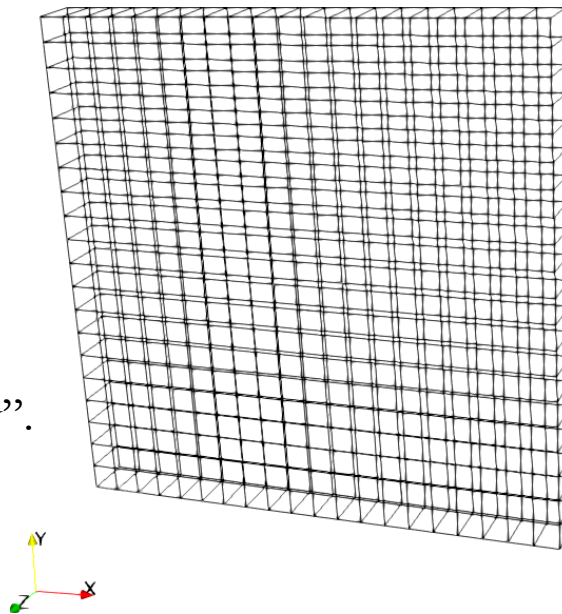
pyramid

„potoczne” nazwy typów komórek 3D

Siatki strukturalne

Siatki strukturalne – siatki składające się z komórek o topologii czworobocznej lub prostopadłościowej (najczęściej), posiadające wyraźnie określone „wiersze”, „kolumny” oraz „warstwy”.

Położenie komórki
definiowane jest indeksami
„wiersza”, „kolumny” i „warstwy”.

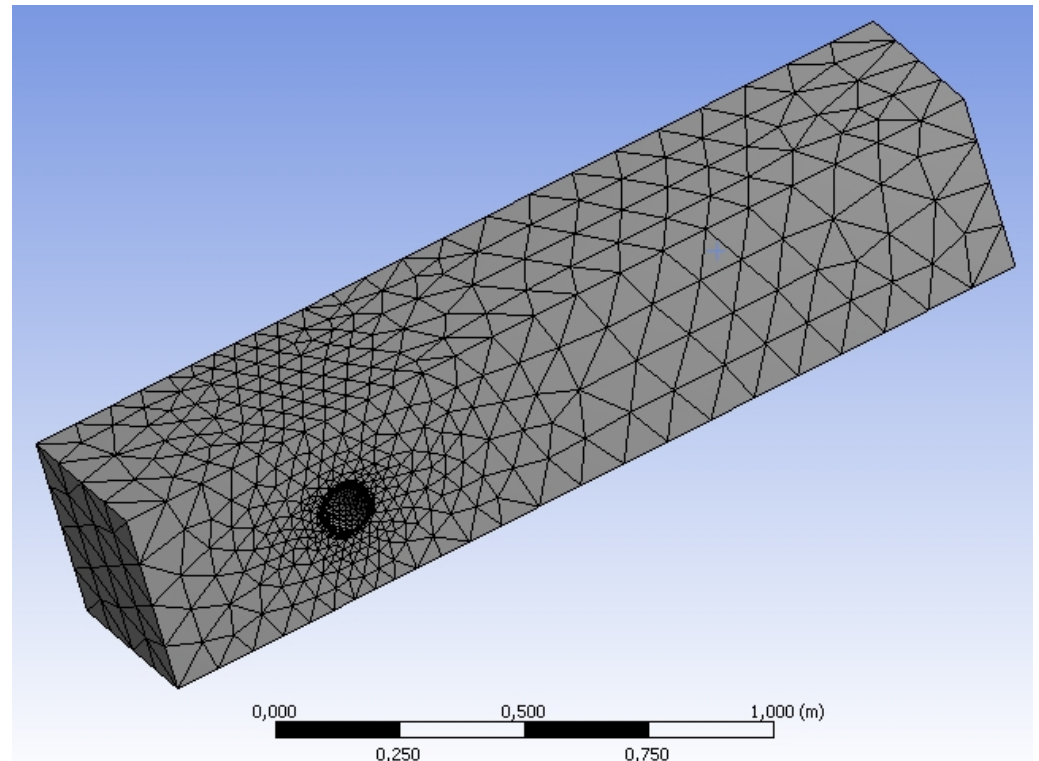


Przykład siatki strukturalnej
– tzw. zagadnienie „wnęki” (OpenFOAM).

Siatki niestrukturalne

Siatki niestrukturalne – siatki składające się z komórek o topologii innej niż czworoboczna lub prostopadłościenna.

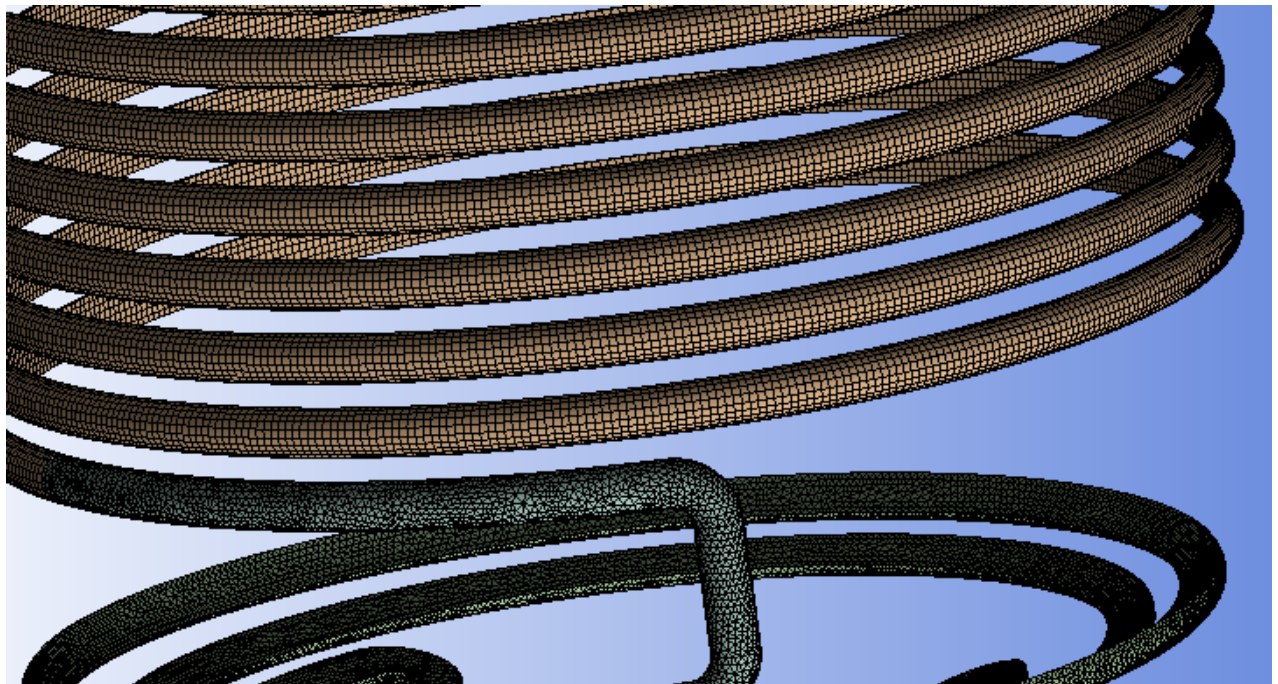
Położenie komórki definiowane jest jej liczbą porządkową (od 1 do n , gdzie n – liczba komórek siatki).



Przykład siatki niestrukturalnej
– opływ przeszkody walcowej (ANSYS Meshing 14.5).

Siatki hybrydowe

Siatki hybrydowe – siatki składające się z regionów zawierających zarówno siatki strukturalne, jak i niestukturalne.



Przykład siatki hybrydowej:

- siatka strukturalna w obszarze rury o przekroju w kształcie połowy koła,
- siatka niestukturalna w obszarze rury o przekroju kołowym.

Siatki hybrydowe

siatki strukturalne

- korzystniejsze obliczeniowo
- łatwiejsze w generacji
- dają prostsze schematy numeryczne
- łatwa identyfikacja „sąsiadów” (po indeksach)
- trudne do zastosowania w przypadku skomplikowanej geometrii

siatki niestrukturalne

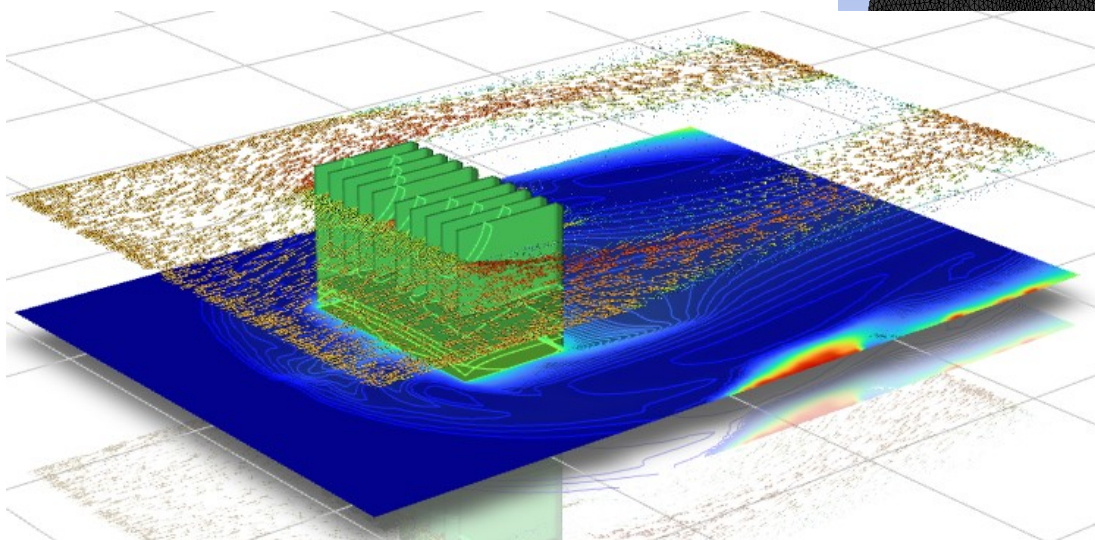
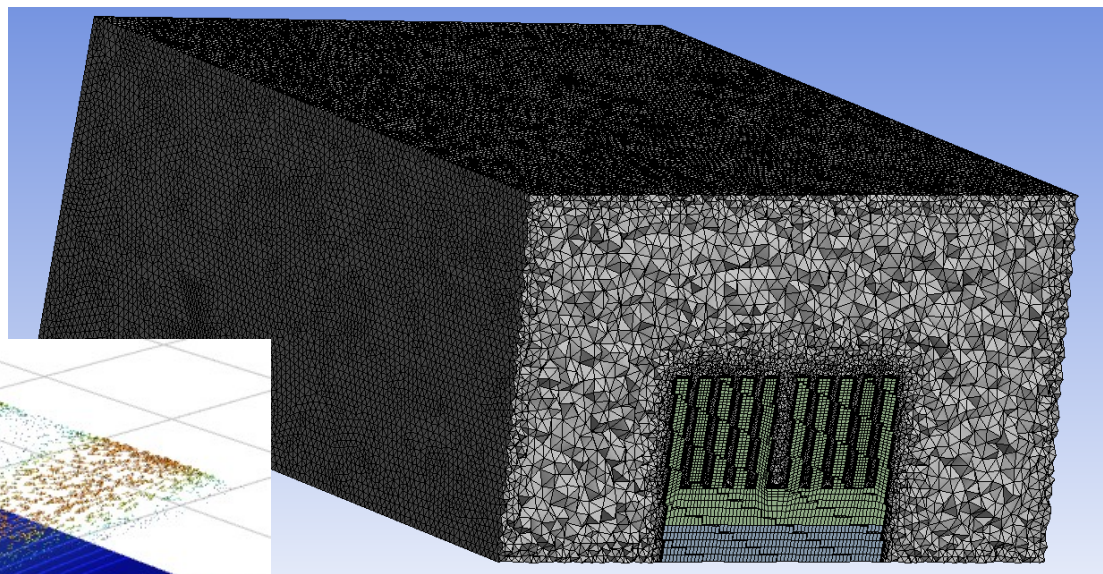
- mniej korzystnie obliczeniowo
- trudniejsze w generacji
- dają skomplikowane schematy numeryczne
- trudniejsza identyfikacja „sąsiadów”
- bardzo korzystne w przypadku skomplikowanej geometrii

siatki hybrydowe

- łączą najlepsze cechy siatek opisanych wyżej
- pozwalają wygenerować siatki o wyższej jakości

Siatki wieloblokowe

Siatki wieloblokowe (multi-block) – siatki składające się z dowolnej liczby regionów o topologii czworobocznej lub czworościennej, tworzących razem jedną domenę obliczeniową.

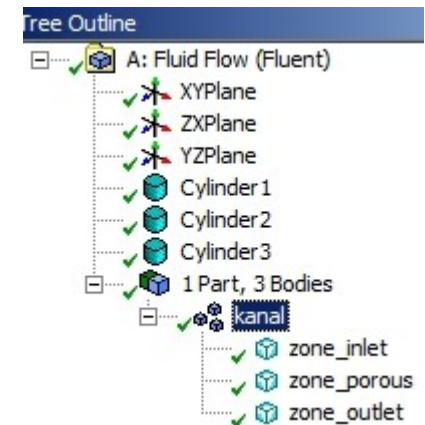


Przykład wieloblokowej siatki hybrydowej z warstwą inflacyjną (ANSYS Fluent).

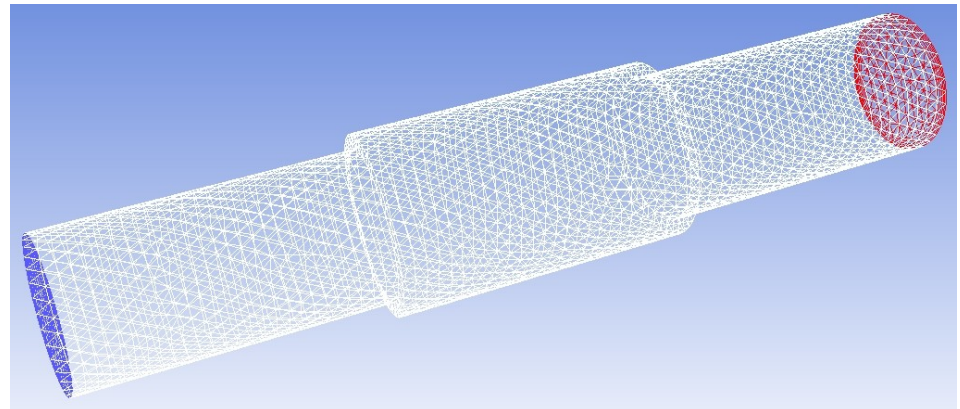
Siatki wielostrefowe

Siatki wielostrefowe (multi-zone) – siatki składające się z regionów zawierających dowolne rodzaje siatek, przeznaczone do stosowania specjalnych modeli lub technik obliczeniowych, np.:

- siatki ze strefą o innych cechach,
- siatki z ruchomą strefą odniesienia,
- siatki ze strefą ruchomą.

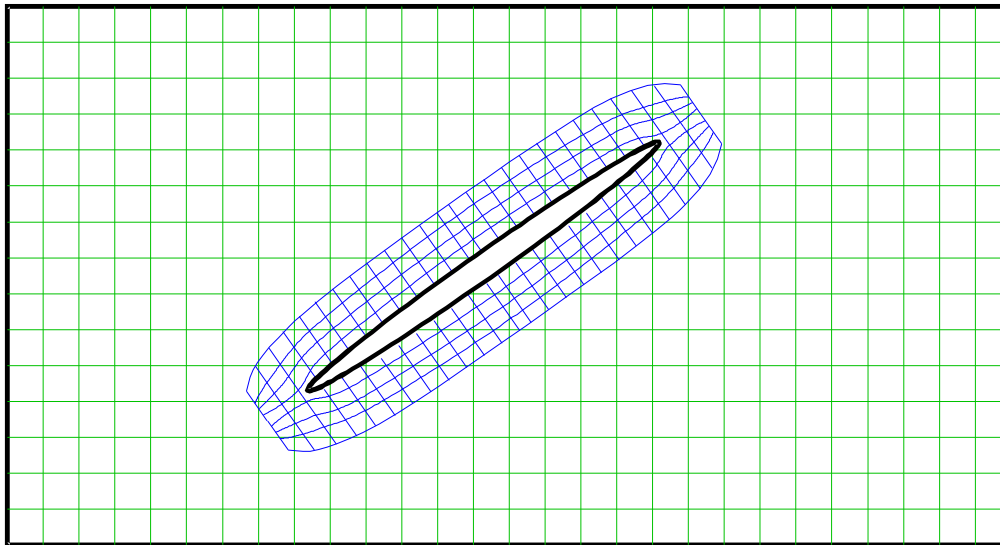


Przykład siatki podzielonej na strefy – strefa środkowa to obszar, w którym ma być zdefiniowany materiał porowaty (ANSYS Meshing 14.5).

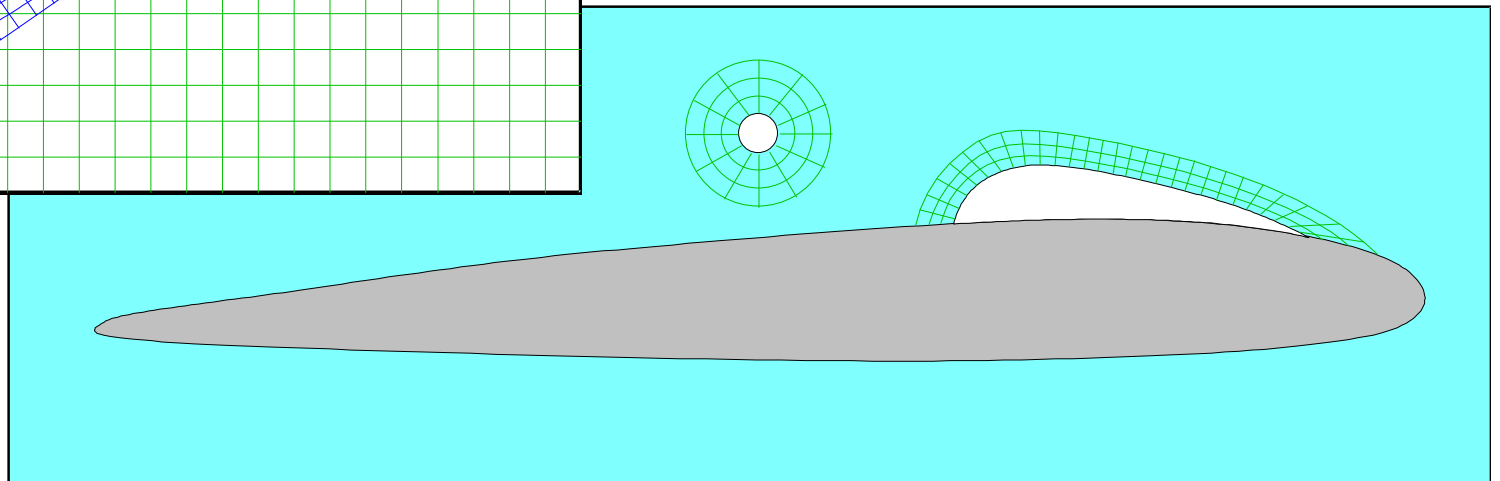


Siatki nakładające się

Siatki nakładające się (siatki overset, siatki chimery) – niezależne siatki numeryczne operujące na całości lub części tej samej domeny. Wadą tego typu rozwiązania jest konieczność wymiany danych między siatkami.

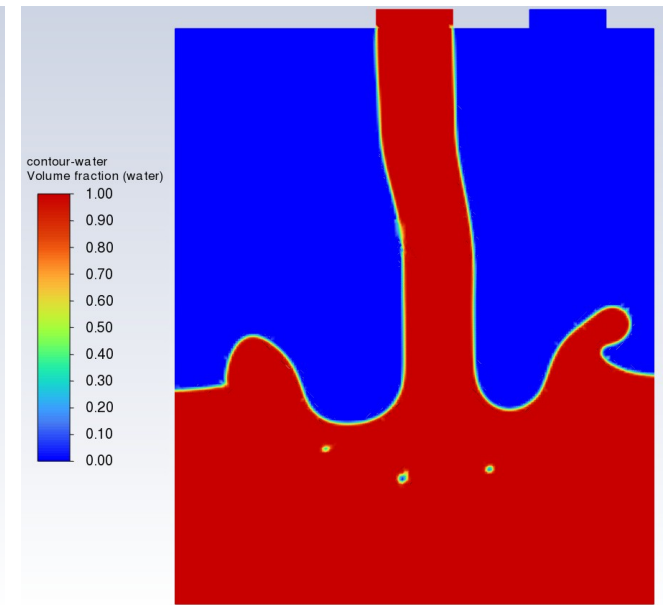
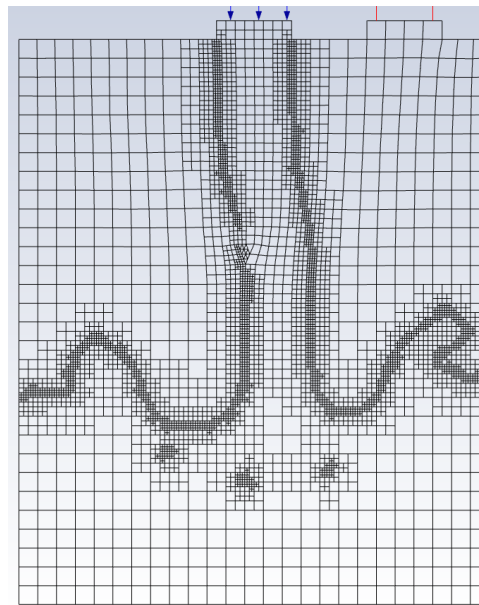
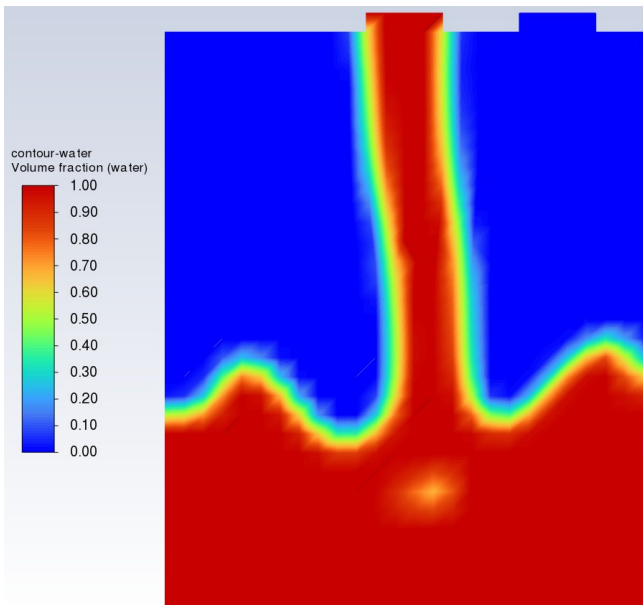


Przykłady siatek nakładających się.



Siatki adaptujące się

Siatki adaptujące się – siatki, w których lokalizacje węzłów i/lub liczba komórek zmienia się automatycznie w trakcie symulacji na podstawie określonych parametrów, np. wielkości lokalnego gradientu wybranej funkcji skalarnej lub wektorowej.



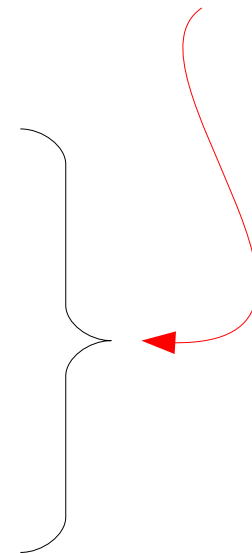
Przykład napelniani zbiornika 2D: wynik dla siatki stalej (po lewej) oraz adoptujacej sie (po prawej)

Siatki ruchome

Siatki ruchome – siatki przeznaczone do modelowania układów z ruchomymi brzegami domen. Rozróżnia się siatki:

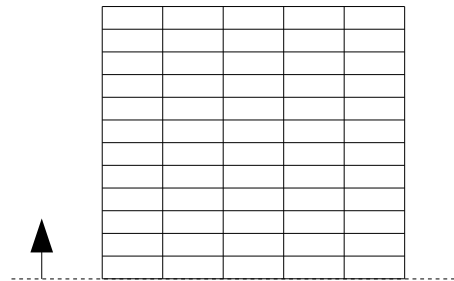
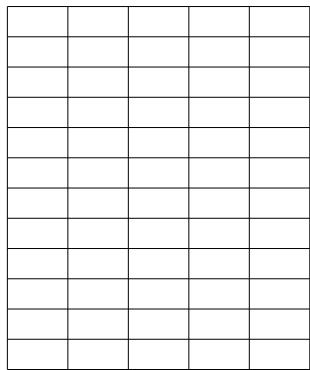
- o ruchu prostoliniowym:
 - o stałej liczbie komórek,
 - o zmiennej liczbie komórek aktywnych,
 - o zmiennej liczbie komórek,
- o ruchu obrotowym:
 - Single Reference Frame,
 - Multiple Reference Frame (model stacjonarny):
 - Frozen Rotor Model,
 - Mixing Plane Model,
 - Multiple Reference Frame (model niestacjonarny):
 - Sliding Mesh Model.

W programie może być zdefiniowana domyślna oś obrotu stref ruchomych (w ANSYS Fluent jest to oś Z).



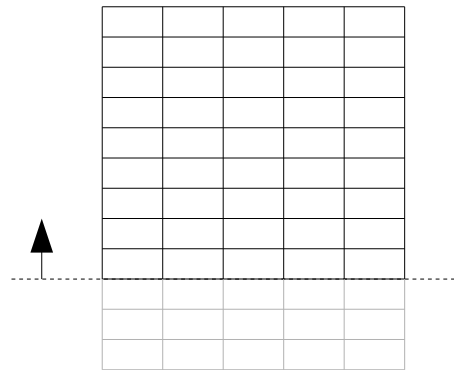
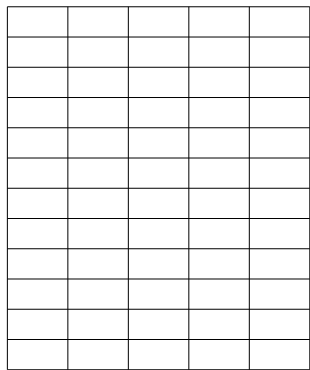
Siatki ruchome

Siatki ruchome o stałej liczbie komórek – siatki zbudowane z określonej liczby komórek, które w trakcie symulacji ulegają “ściskaniu” bądź “rozciąganiu”, zależnie od zmian geometrii układu. Siatki takie nadają się do modelowania stosunkowo niewielkich zmian geometrii nie obracających się elementów. Przykładem może być ruch tłoka w cylindrze lub zmienna geometria skrzydła samolotu. Siatki tego typu mogą być strukturalne bądź niestructuralne.



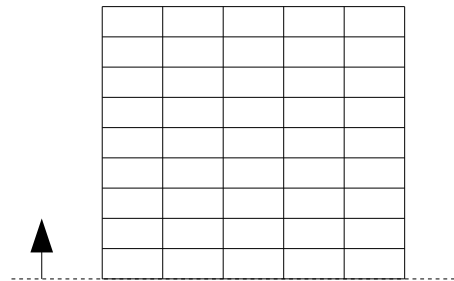
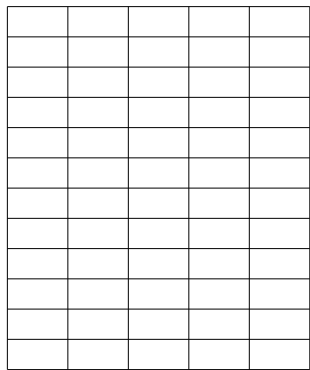
Siatki ruchome

Siatki ruchome o zmiennej liczbie komórek aktywnych – siatki zbudowane z określonej liczby komórek, które w trakcie symulacji ulegają aktywacji lub dezaktywacji, zależnie od ruchów brzegów domeny. W tym przypadku właściwa siatka numeryczna jest nieruchoma, ruchomy jest za to zbiór komórek aktywnych. Siatki takie nadają się do modelowania przepływów z ruchomymi ściankami.



Siatki ruchome

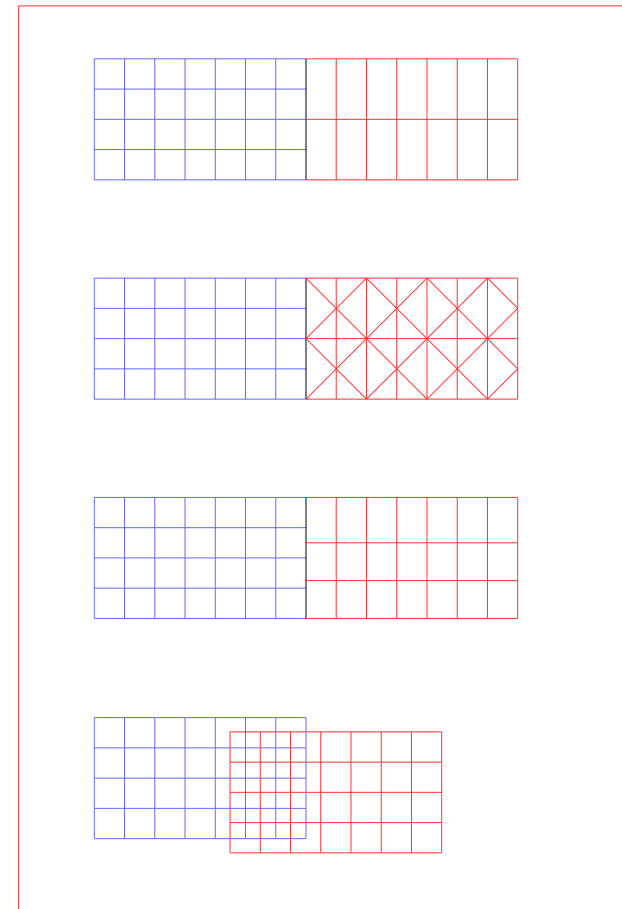
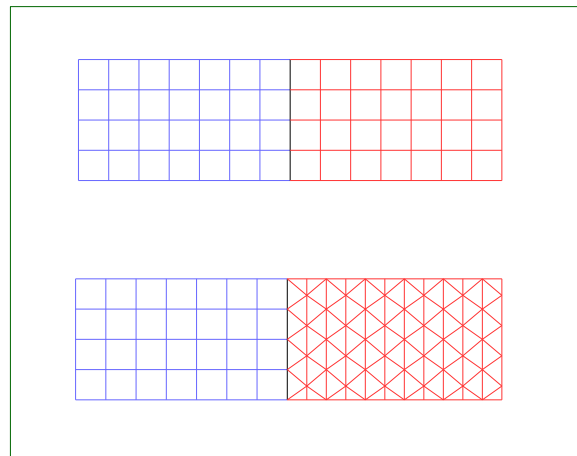
Siatki ruchome o zmiennej liczbie komórek – siatki zbudowane ze zmieniającej się w czasie liczby komórek, zależnie od zmian geometrii. Siatki takie są najbardziej uniwersalne, gdyż nadają się do modelowania dowolnych układów złożonych, o wzajemnie zmiennym położeniu. Przykładem może być symulacja wyprzedzania samochodów na autostradzie bądź symulacja odrzucania stopni rakiet. W takim przypadku występuje względny ruch obiektów, niemożliwy do modelowania przy użyciu siatek nieruchomych.



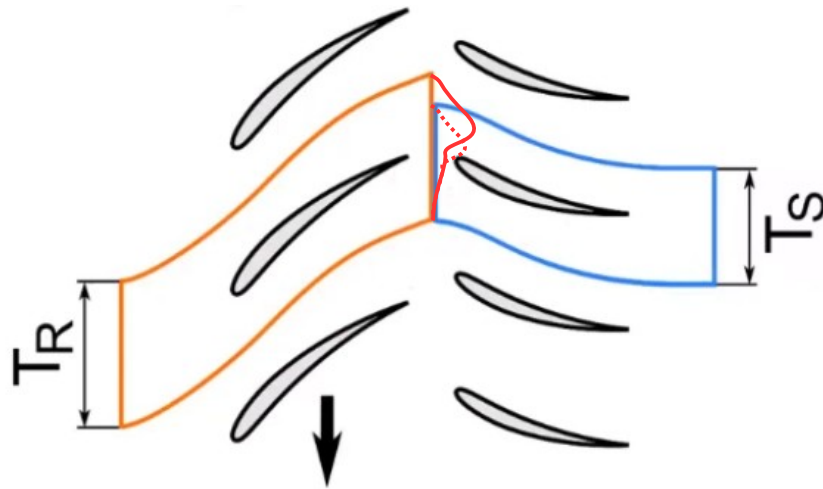
Siatki ruchome

Interfejs – linia lub powierzchnia graniczna między blokami lub strefami siatki numerycznej. Interfejsy mogą być:

- zgodne
(z węzłami współdzielonymi lub nie),
- niezgodne.

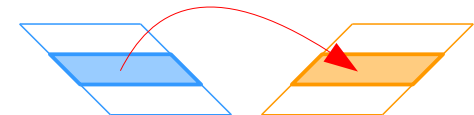
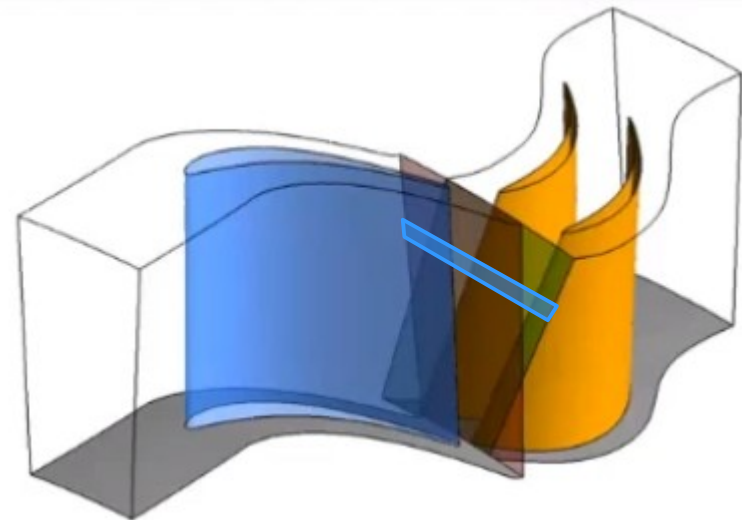


Siatki ruchome

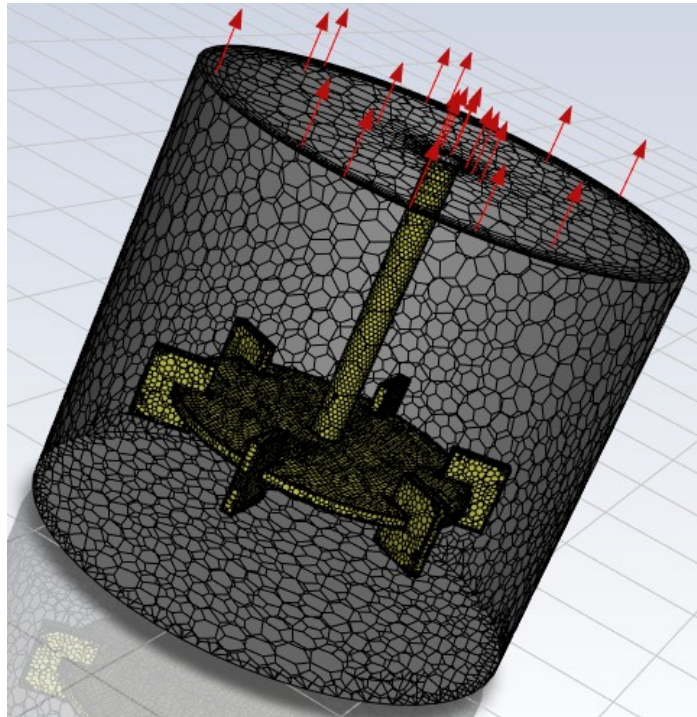


Przykład dopasowywania interfejsów siatek ruchomych metodą „Mixing Plane”
– podział obu stron interfejsu na paski o takiej samej wysokości (szerokość i kształt paska nie ma znaczenia) i przekazywanie wartości średnich, obliczonych dla jednego paska, do paska naprzeciwległego (materiały szkoleniowe firmy SymKom).

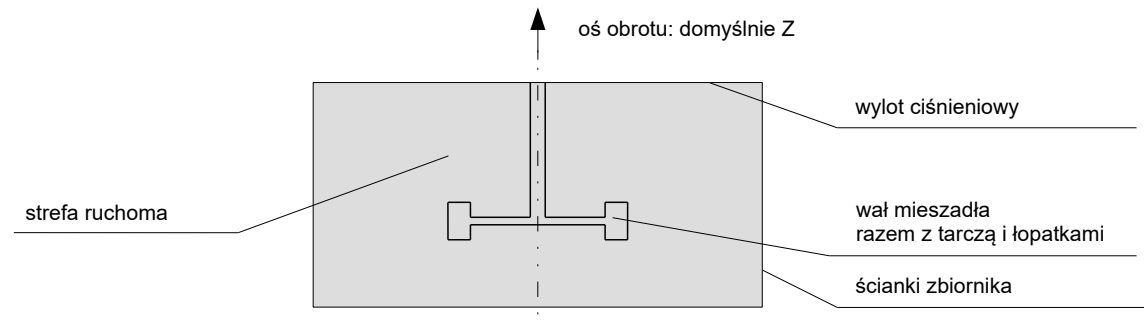
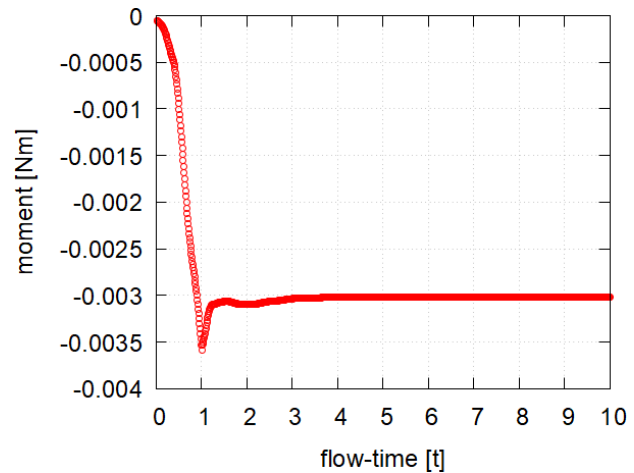
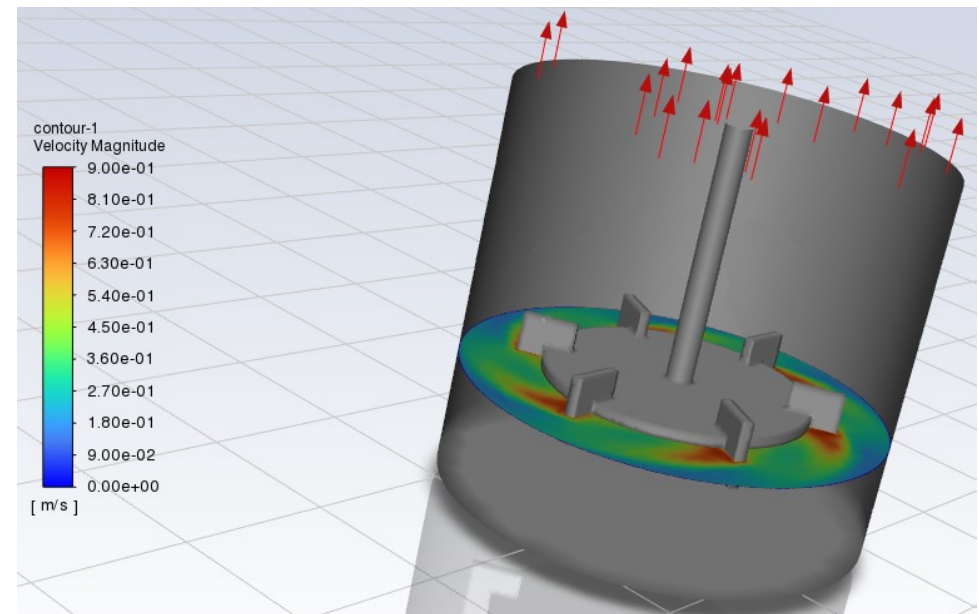
Przykład dopasowywania interfejsów siatek ruchomych metodą „Pinch Scale”
– przeskalowanie pól na jednej z powierzchni interfejsu (materiały szkoleniowe firmy SymKom).



Siatki ruchome

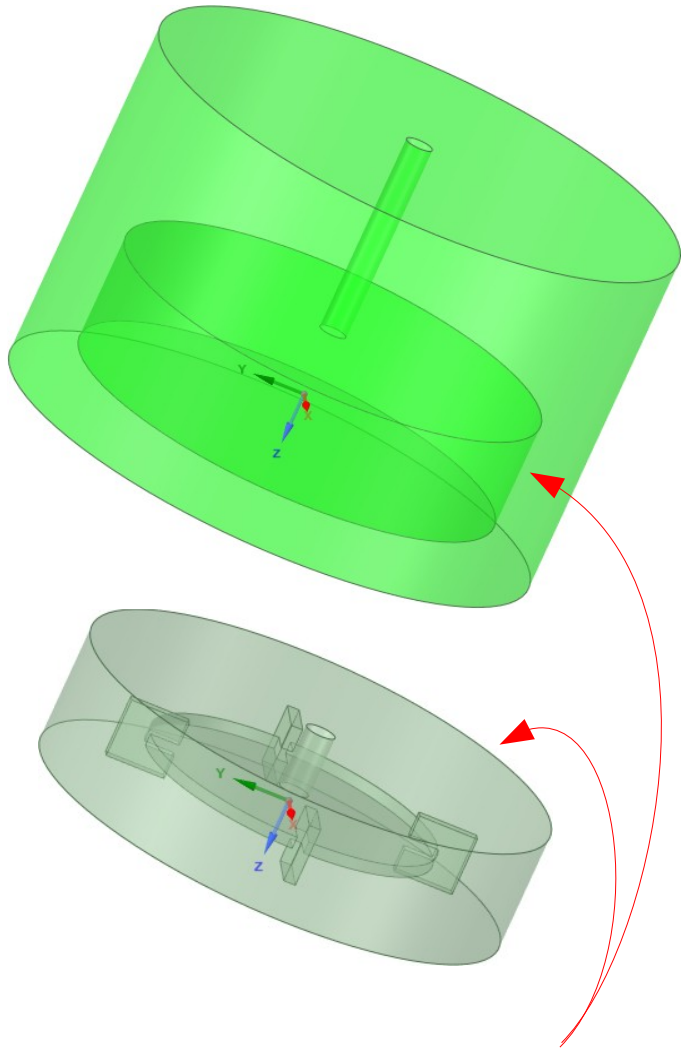


Przykłady zastosowania techniki Single Reference Frame
[Wojciech Sobieski, ANSYS Fluent]

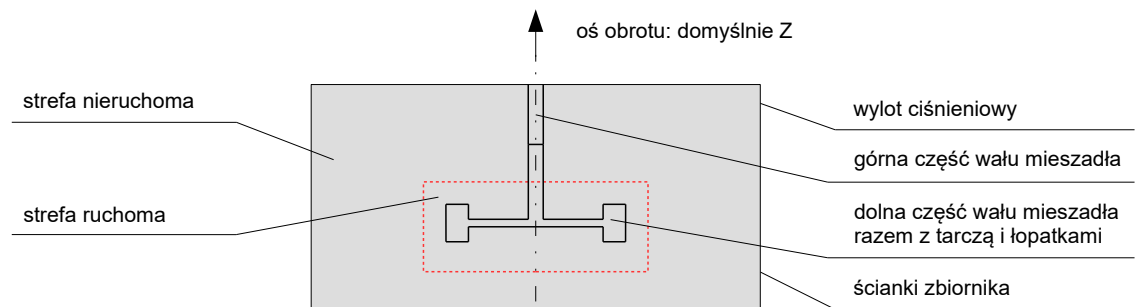
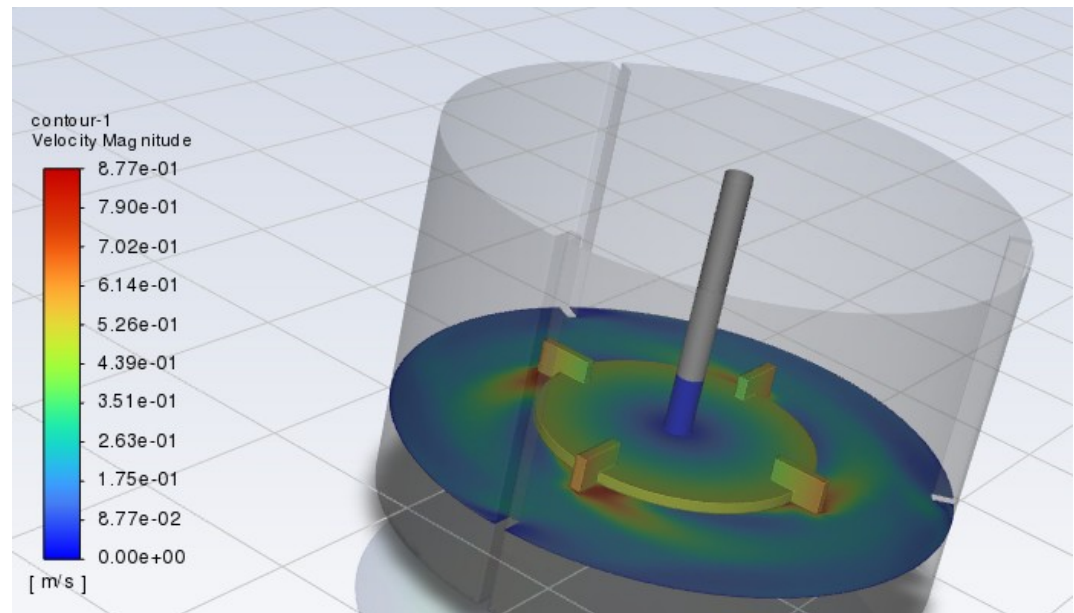


Siatki ruchome

Przykłady zastosowania techniki Multiple Reference Frame
[Wojciech Sobieski, ANSYS Fluent]

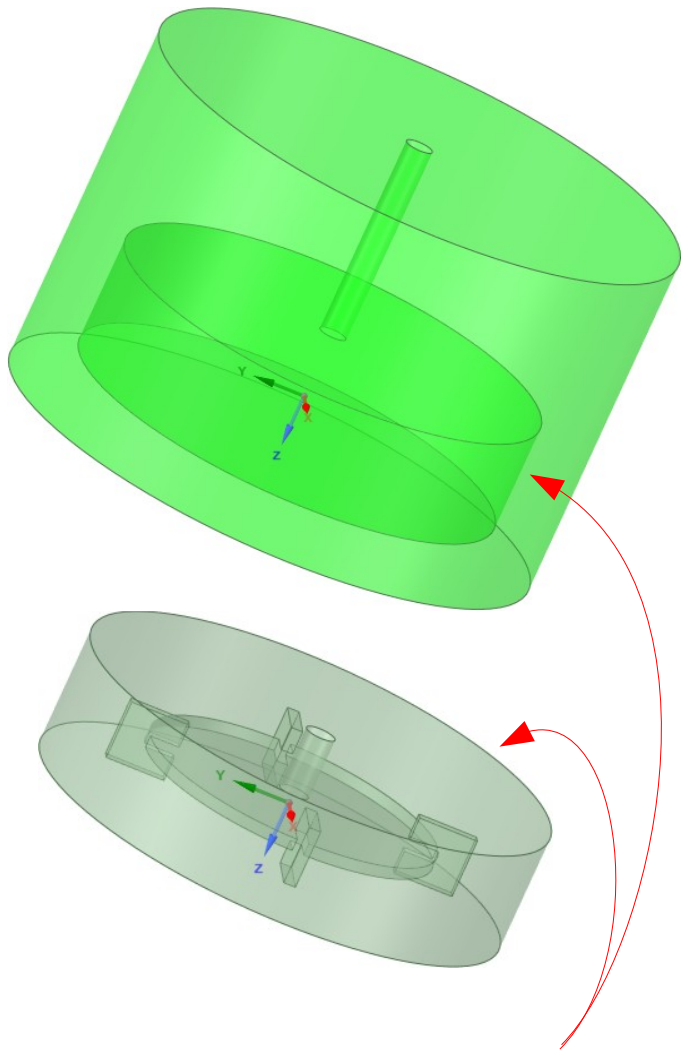


Tu interfejs musi być zgodny.

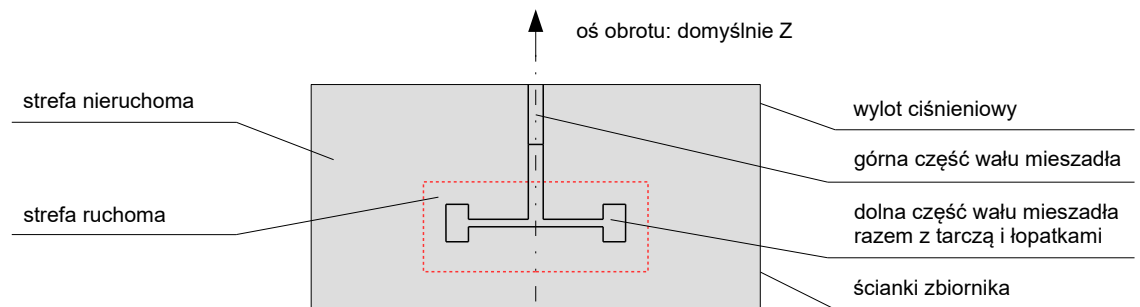
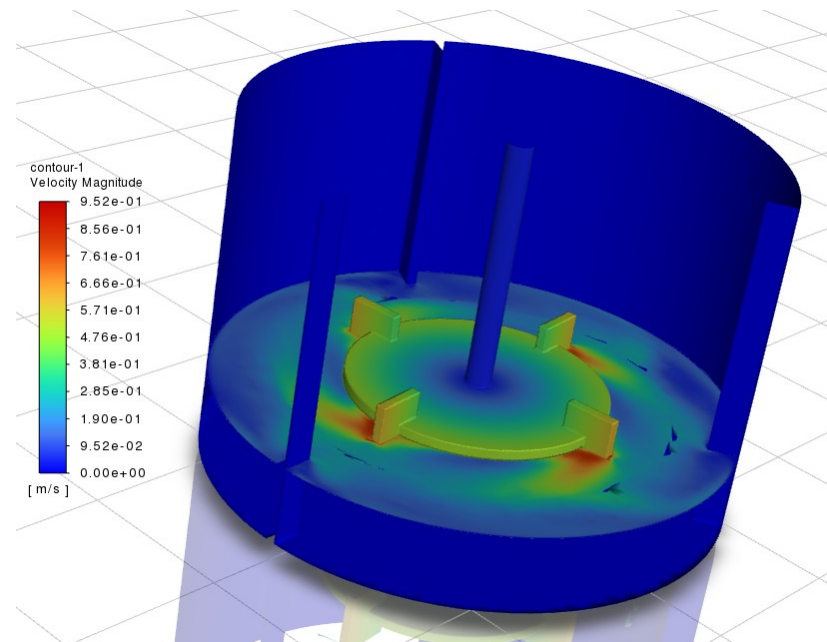


Siatki ruchome

Przykłady zastosowania techniki Sliding Mesh
[Wojciech Sobieski, ANSYS Fluent]

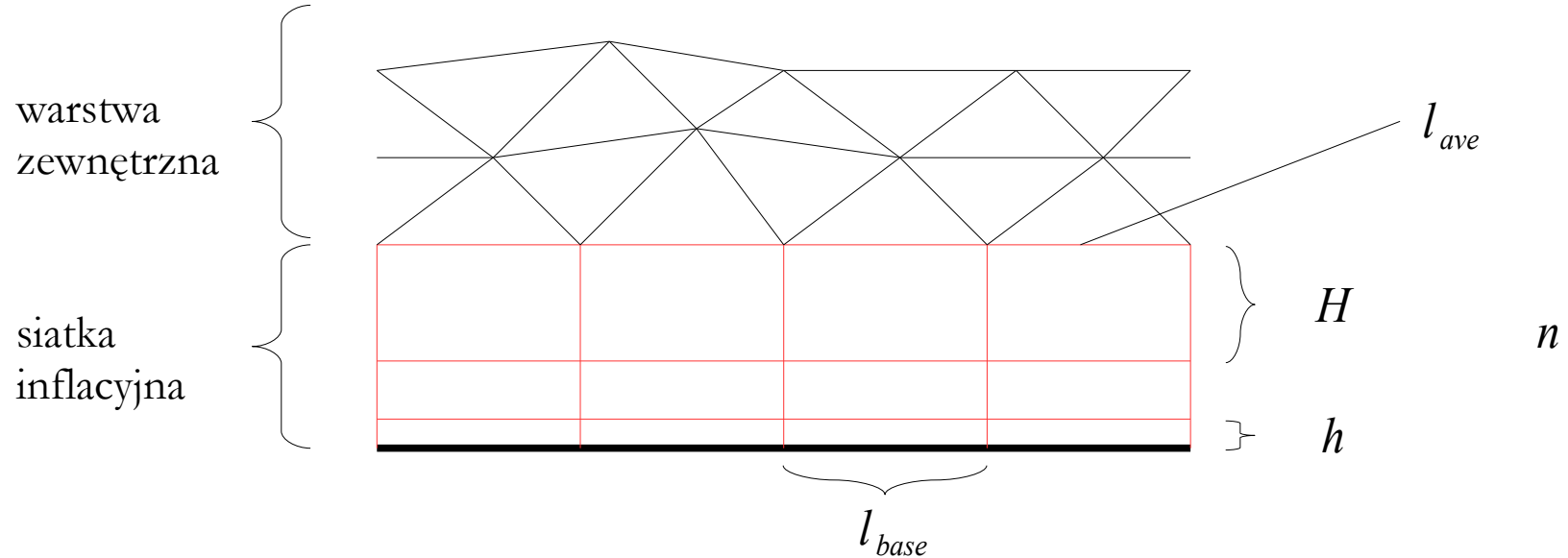


Tu interfejs musi być niezgodny.



Siatki inflacyjne

Siatka inflacyjna – siatka strukturalna tworzona na powierzchniach ścianek, w celu lepszego odwzorowania warstwy przyściennej.



h - grubość pierwszej warstwy

H - grubość ostatniej warstwy

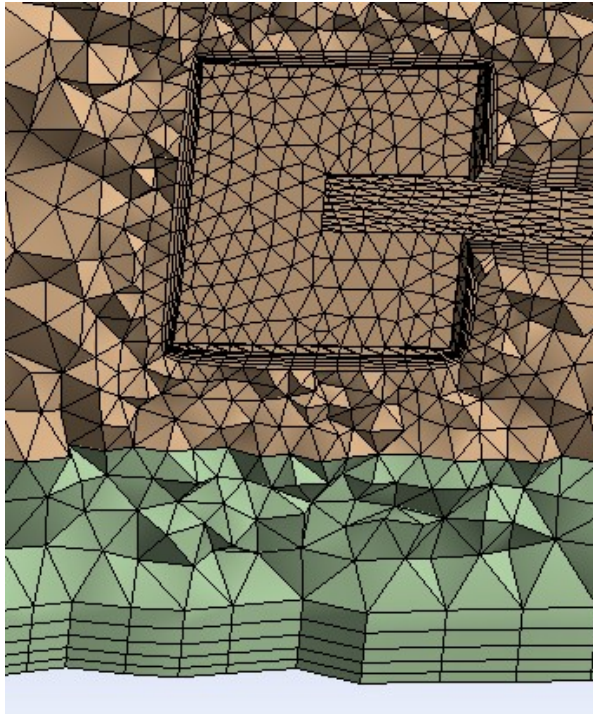
g_r - współczynnik przyrostu grubości

n - liczba warstw

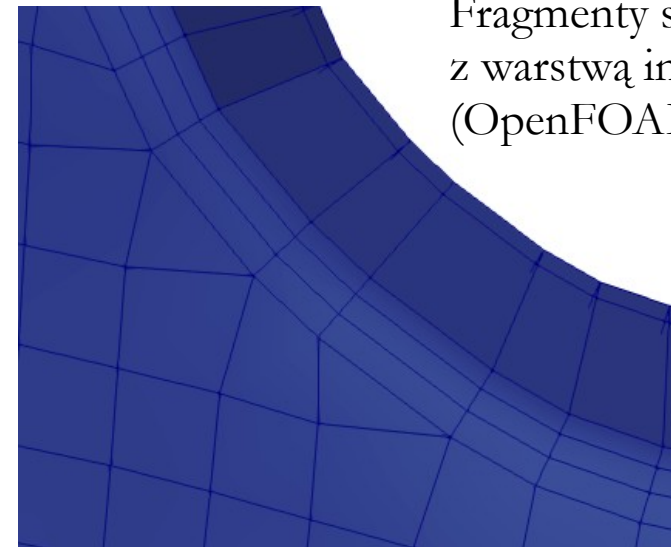
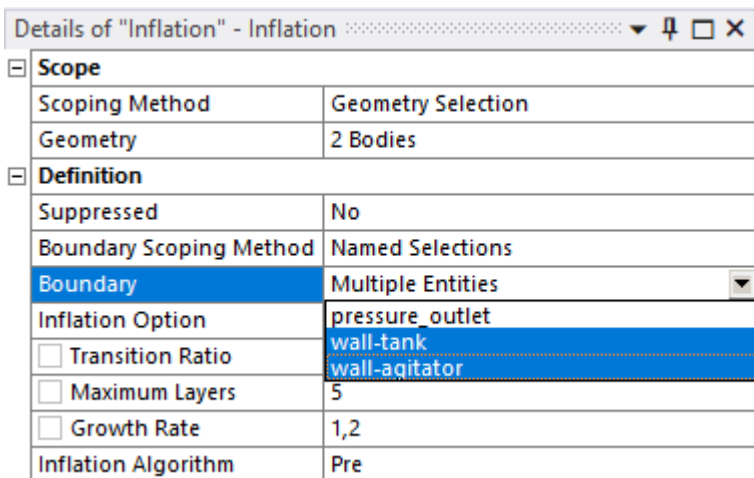
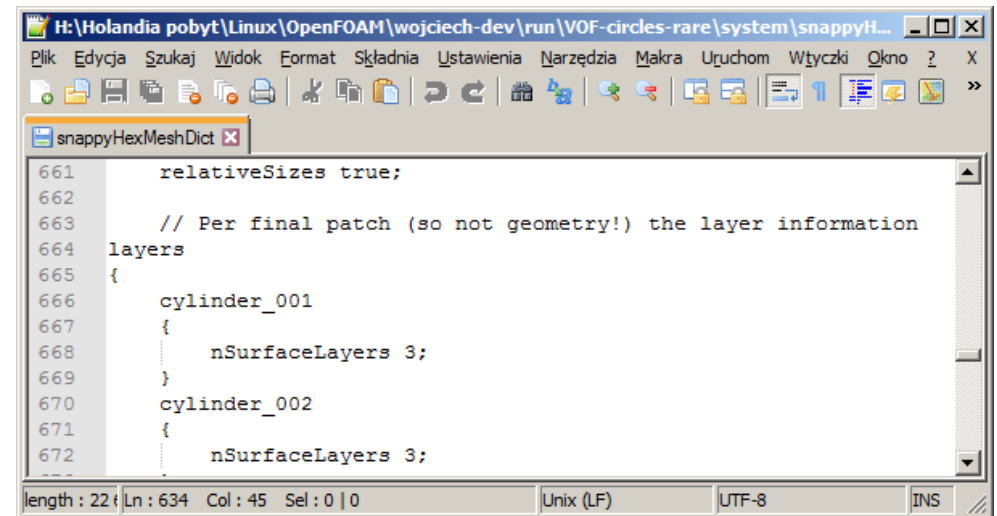
l_{ave} - średnia długość krawędzi komórek w warstwie zewnętrznej

l_{base} - średnia długość podstawy komórek znajdujących się w pierwszej warstwie

Siatki inflacyjne



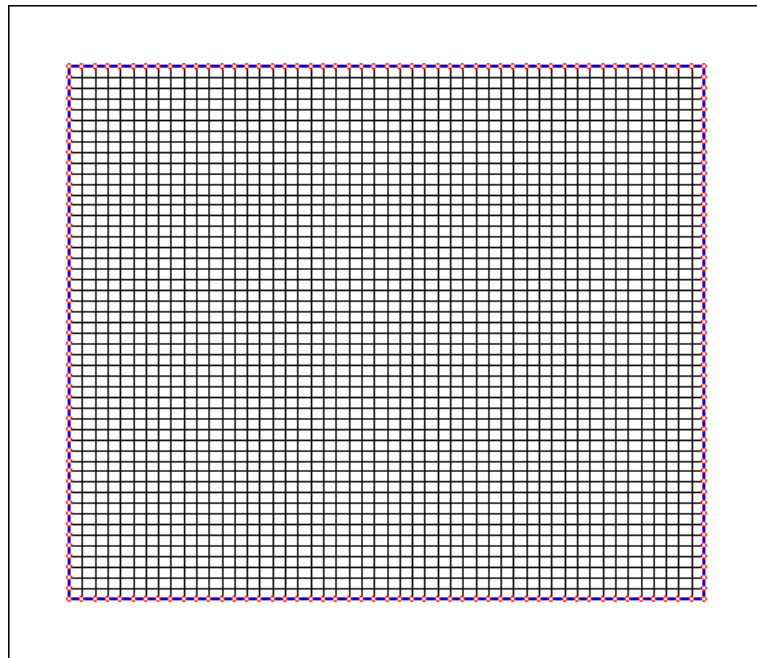
Fragmenty siatki z warstwą inflacyjną
(ANSYS Meshing 2022 R1).



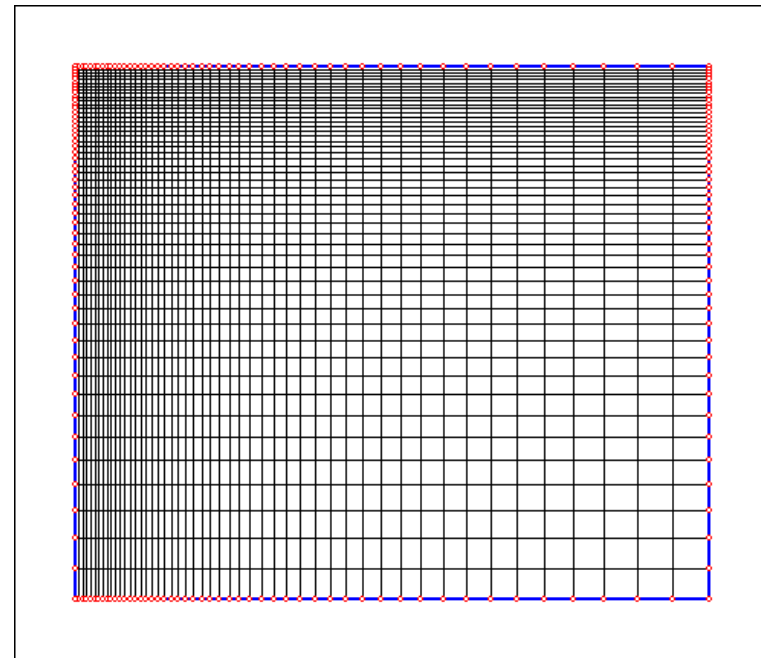
Fragmenty siatki
z warstwą inflacyjną
(OpenFOAM).

Funkcje rozpinające

Funkcja rozpinająca (bias) – funkcja umożliwiająca nierównomierne rozłożenie węzłów na wybranym kierunku.



Przykłady dystrybucji węzłów siatki funkcją liniową.



Przykłady dystrybucji węzłów siatki funkcją wykładniczą.

Wymagania dotyczące siatek numerycznych

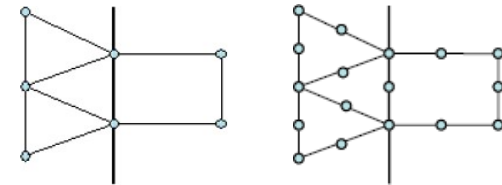
Wymagania dotyczące siatek numerycznych:

- **Dostateczna gęstość siatki** – wystarczająca liczba komórek, aby uchwycić wszystkie istotne gradienty pola fizycznego, zapewniając dokładność i wiarygodność wyników numerycznych.
- **Dostosowanie do geometrii** – siatka powinna wiernie odwzorowywać kształty obiektów, granice i powierzchnie, aby nie wprowadzać błędów geometrycznych do obliczeń przepływu.
- **Dostosowanie do fizyki** – komórki i ich rozmieszczenie powinny odpowiadać charakterowi przepływu, np. gęstsza siatka w strefach boundary layer, wirach czy strefach dużych gradientów temperatury.
- **Jakość komórek** – minimalizacja skosu, wydłużenia i deformacji komórek; wysoka jakość zapewnia stabilność obliczeń i zmniejsza błędy numeryczne.
- **Stopniowanie siatki** – zmiana wielkości komórek powinna być płynna i stopniowa, bez nagłych skoków, aby uniknąć lokalnych błędów i problemów z konwergencją solvera.
- **Zagęszczenie w strefach krytycznych** – w obszarach o dużych zmianach pola fizycznego (gradienty prędkości, ciśnienia, temperatury) należy stosować gęstszą siatkę dla lepszej dokładności lokalnej.
- **Minimalizacja liczby komórek bez utraty dokładności** – optymalizacja liczby elementów pozwala na skrócenie czasu obliczeń i zmniejszenie zapotrzebowania pamięci, przy zachowaniu wymaganej precyzji wyników.

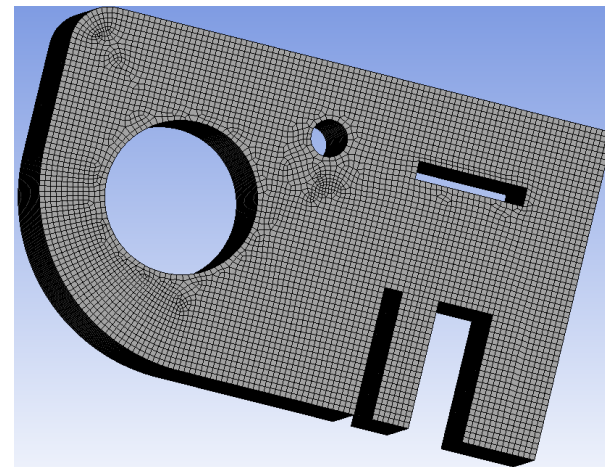
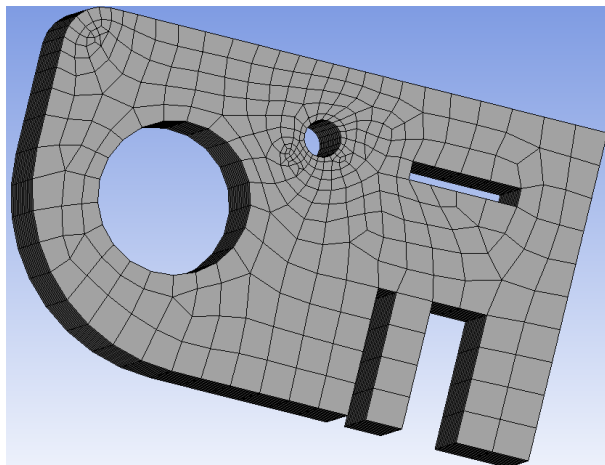
Praca w ANSYS Meshing 2022 R2

Sekcja Mesh – Defaults:

- **Physics Reference** – przeznaczenie siatki (jaki rodzaj analizy będzie wykonywany).
- **Solver Preferences** – przeznaczenie siatki (jaki konkretnie solver będzie używany).
- **Element Order** – sposób tworzenia komórek:
 - **Program Controlled** – automatyczny, w zależności od wybranego typu analizy i solwera,
 - **Linear** – bez węzłów środkowych (po lewej),
 - **Quadratic** – z węzłami środkowymi (po prawej).



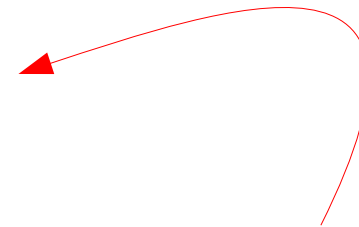
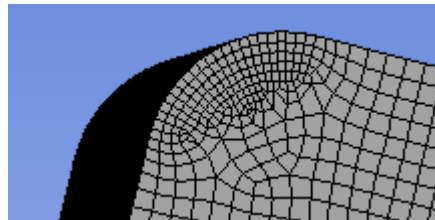
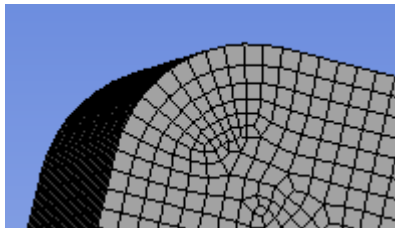
- **Element size** – średni rozmiar komórki (**ważny parametr**).



Praca w ANSYS Meshing 2022 R2

Sekcja Mesh – Sizing:

- **Use Adopting Sizing** – opcja automatycznego sterowania rozmiarami komórek sąsiednich (lepiej jest sterować ręcznie).
- **Growth rate** – stopień wzrostu sąsiednich komórek: 1.2 to wartość maksymalna.
- **Max Size** – maksymalny dopuszczalny rozmiar komórki.
- **Mesh Defeaturing** – usuwanie niedokładności (np. błędów lokalizacji węzłów) o wielkościach mniejszych niż wartość parametru Defeature Size.
- **Capture Curvature** – sterowanie wielkością komórek na podstawie **krzywizny brzegów**:
 - **Curvature Min Size** – minimalny dopuszczalny rozmiar komórki (czasami potrzebne, bo algorytm tego narzędzia czasami nadmiernie zagęszcza komórki),
 - **Curvature Normal Angle** – **maksymalny kąt**, na jaki może rozszerzać się komórka siatki.

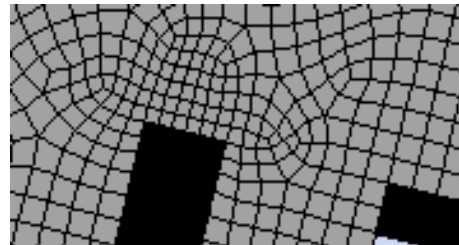
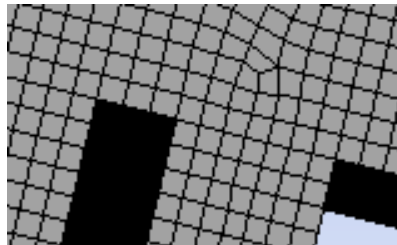


Tu zmieniono kąt z wartości domyślnej (12°) na 4° .

Praca w ANSYS Meshing 2022 R2

Sekcja Mesh – Sizing:

- **Capture Proximity** – sterowanie wielkością komórek na podstawie **odległości brzegów**:
 - **Proximity Min Size** – minimalny dopuszczalny rozmiar komórki (czasami potrzebne, bo algorytm tego narzędzia czasami nadmiernie zagęszcza komórki),
 - **Proximity Gap Factor** – **minimalna dopuszczalna liczba komórek na danym brzegu**.
- **Proximity Size Sources** – dodatkowe opcje narzędzia Proximity:
 - Faces,
 - Edges,
 - Faces and Edges.



Tu zmieniono liczbę komórek
z wartości domyślnej (3) na 6.

Praca w ANSYS Meshing 2022 R2

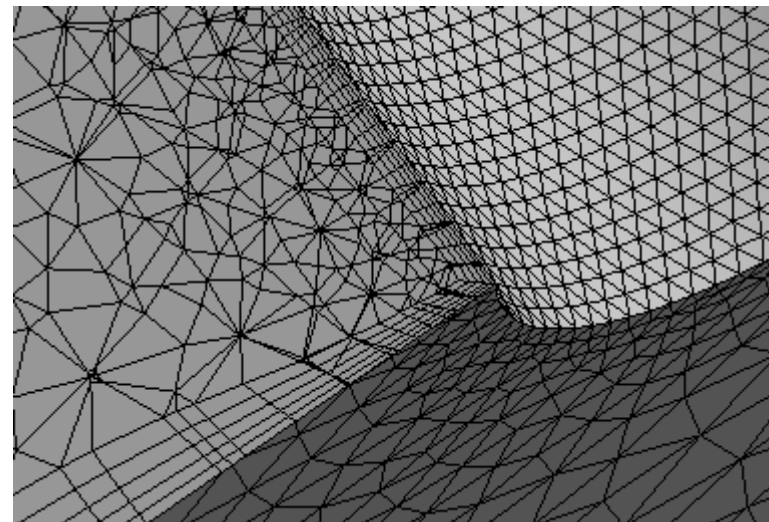
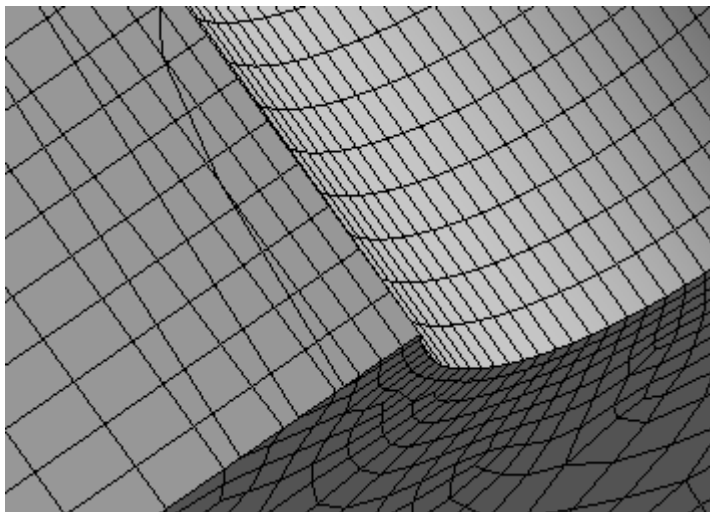
Sekcja Mesh – Quality:

- **Check Mesh Quality** – sterowanie zachowaniem przy pojawieniu się błędów:
 - **Yes, Errors** – jeśli algorytm tworzenia siatki nie może wygenerować siatki, która przekracza wszystkie limity błędów, drukowany jest komunikat o błędzie, a tworzenie siatki kończy się niepowodzeniem.
 - **Yes, Errors and Warnings** – jak wyżej tyle, że oprócz błędów pojawiają się różne komunikaty ostrzeżenia.
 - **No** – większość narzędzi kontroli siatki zostaje wyłączona (jakość siatki będzie sprawdzana później, po jej wygenerowaniu).
- **Skewness** – kryterium skośności: wprowadza się wartość z zakresu od 0 (wyższa jakość) do 1 (niższa jakość). Wartość domyślna to 0.9. W przypadku siatki czworościennej nie należy ustawiać docelowej skewness na wartość < 0.8 .
- **Smoothing** – stopień wygładzenia: algorytm próbuje poprawić jakość komórki poprzez przesuwanie lokalizacji węzłów względem otaczających je węzłów i komórek. Opcje Low, Medium i High odnoszą się do liczby iteracji potrzebnych do wykonania wygładzenia.
- **Mesh Metric** – opcja umożliwiająca przeglądanie i wizualizację różnych wskaźników jakości siatki.

Praca w ANSYS Meshing 2022 R2

Sekcja Mesh – Inflation:

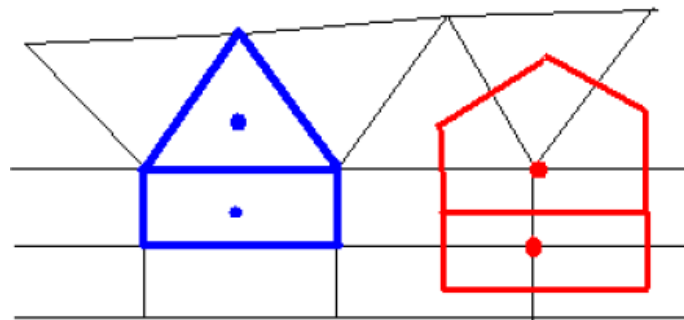
- **Use Automatic Inflation** – opcja automatycznego dodawania siatki przyściennej:
 - **None** – bez siatki przyściennej.
 - **Program Controlled** – wg uznania programu.
 - **All Faces on Chosen Named Selection** – tworzy siatkę przyścienną na wszystkich wskazanych brzegach (aby wskazać jakiś brzeg musi on posiadać nazwę; można wskazać kilka brzegów zaznaczając pozycje z listy z klawiszem CTRL).



Praca w ANSYS Meshing 2022 R2

Sekcja Mesh – Inflation:

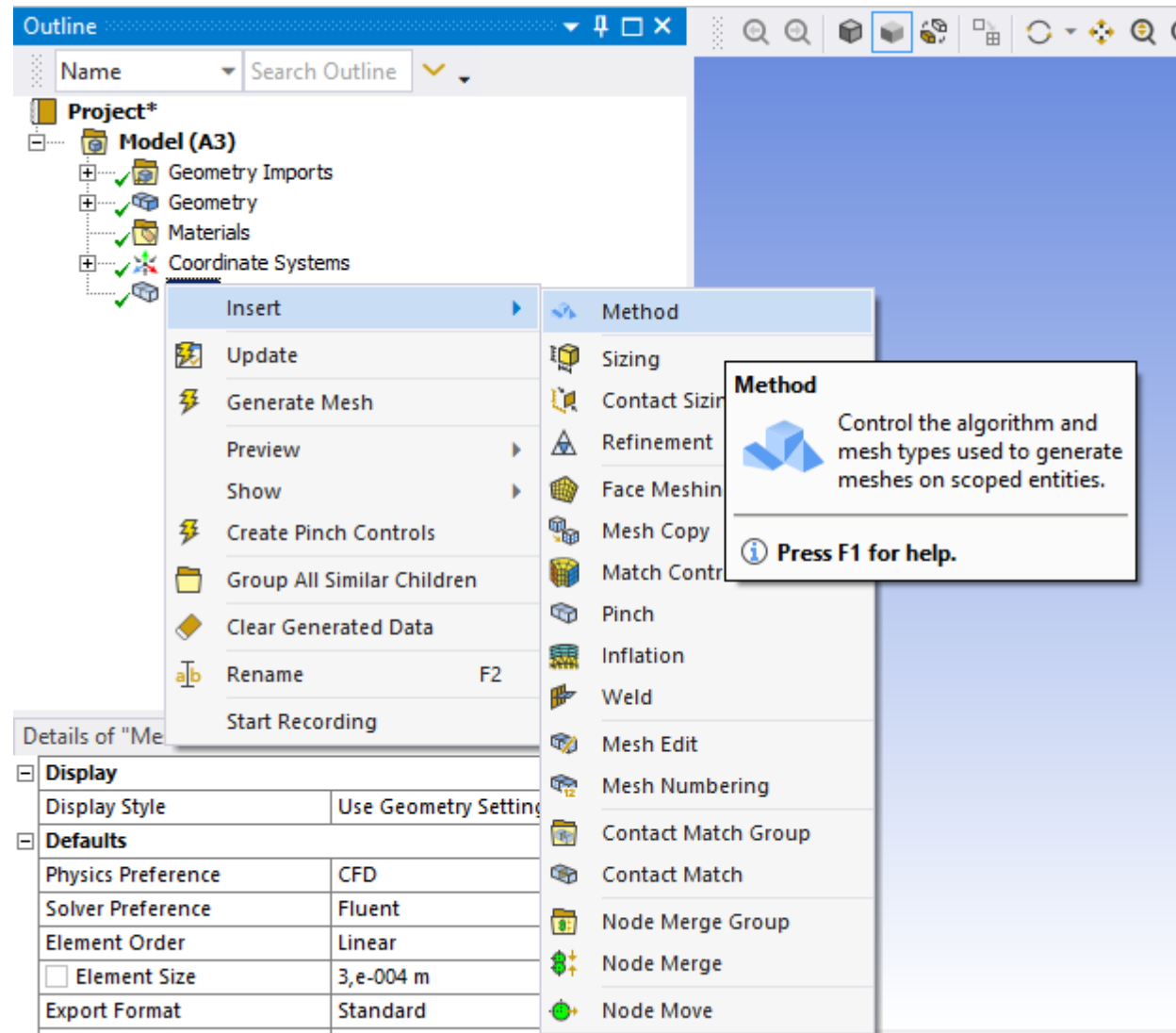
- **Transition Ratio** – współczynnik określający stosunek rozmiarów komórek znajdujących się w ostatniej warstwie siatki przyściennej i pierwszej warstwie siatki wewnętrznej. Dla siatek centralnych względem węzła (po lewej) wartość optymalna to 0.272.



- **Maximum Layers** – liczba warstw siatki przyściennej.
- **Growth Rate** – stopień wzrostu komórek warstwy przyściennej (inflacyjnej). Wartości dopuszczalne są od 0.1 do 5.0. Wartość domyślna to 1.2.
- **Inflation Algorithm** – algorytm tworzenia warstwy inflacyjnej:
 - **Pre** – zalecany w większości przypadków,
 - **Post** – dopuszczany w pewnych przypadkach (algorytm zostanie w przyszłości usunięty).

Praca w ANSYS Meshing 2022 R2

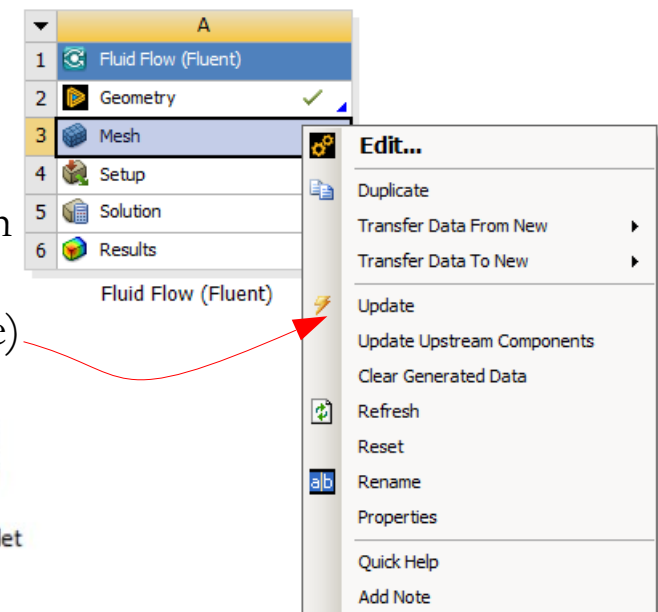
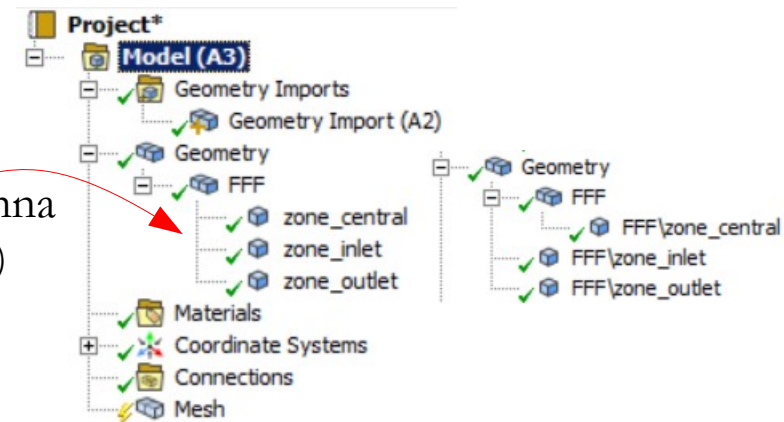
Dodatkowe narzędzia, możliwe do stosowania dla wybranych brył, powierzchni czy krawędzi (ANSYS Meshing 2022 R1).



Praca w ANSYS Meshing 2022 R2

Podsumowanie – typowe kroki:

- Sprawdzić, czy geometria składa się z tylu brył, z ilu powinna
- Nazwać wszystkie brzozy (kontrolować sumę powierzchni)
- Wygenerować siatkę domyślną
- Przeprowadzić globalną konfigurację siatki:
 - wybrać algorytm generacji siatki:
 - sprawdzić czy ciało jest wyciągalne (**Show Sweepable Bodies**)
 - rozważyć podział geometrii na bloki (strefy)
 - ustawić podstawowy rozmiar komórki (**Element Size**)
 - zastanowić się nad opcją **Capture Curvature**
 - zastanowić się nad opcją **Capture Proximity**
- Przeprowadzić lokalną konfigurację siatki:
 - na wybranych bryłach, płaszczyznach lub krawędziach
- Dodać (?) siatkę inflacyjną (przyścienną) na wszystkich ściankach
- Sprawdzić wskaźniki jakości siatki
- Zaktualizować siatkę w środowisku Workbench (PPM + Update)

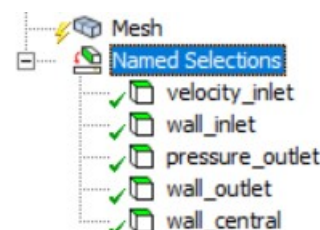


Skewness mesh metrics spectrum

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Orthogonal Quality mesh metrics spectrum

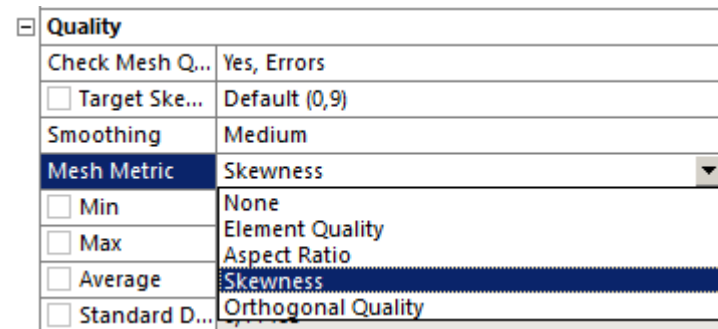
Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00



Kryteria oceny jakości siatki

Kryteria oceny jakości siatki (wg dokumentacji ANSYS Meshing):

- **Element Quality** (jakość elementu) – współczynnik kształtu komórek czworobocznych lub sześciennych obliczany na podstawie objętości lub powierzchni oraz długości krawędzi elementu. Wartość 1 oznacza idealny sześcian lub kwadrat, a wartość 0 oznacza, że element ma zerową lub ujemną objętość.

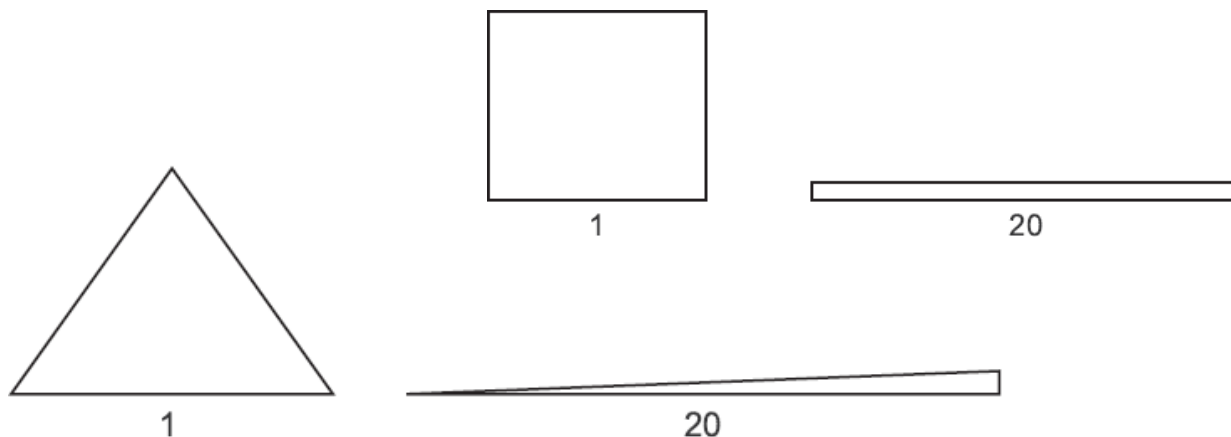


W poprzednich wersjach programu wskaźników jakości siatki było więcej.

Kryteria oceny jakości siatki

Kryteria oceny jakości siatki (wg dokumentacji ANSYS Meshing):

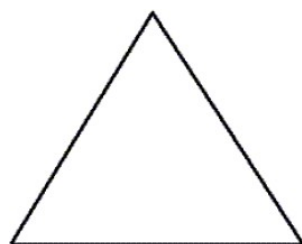
- **Aspect Ratio** (współczynnik kształtu) – współczynnik definiowany jako stosunek długości boków wybranego prostokąta (tego o największej proporcji długości boków) z wszystkich możliwych zbudowanych na danym kształcie (trójkącie lub wieloboku) w odpowiedni sposób. Im wartość bliższa 1 tym lepiej.



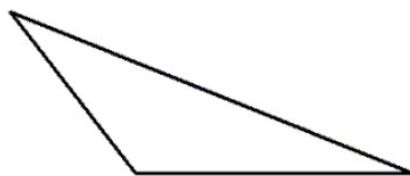
Kryteria oceny jakości siatki

Kryteria oceny jakości siatki (wg dokumentacji ANSYS Meshing):

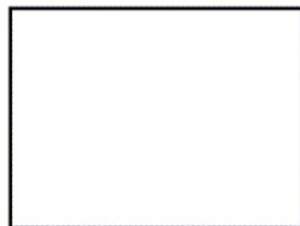
- **Skewness** (skośność) – podstawowy współczynnik kształtu komórek, określający jak bardzo zbliżony jest kształt elementu do trójkąta równobocznego (czworościanu) lub do kwadratu (sześcianu).



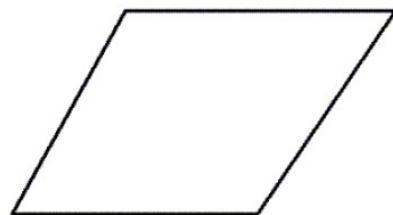
Equilateral Triangle



Highly Skewed Triangle



Equiangular Quad



Highly Skewed Quad

1	zdegenerowany
$0.9 \div <1$	zły
$0.75 \div 0.9$	kiepski
$0.5 \div 0.75$	zadowalający
$0.25 \div 0.5$	dobry
$>0 \div 0.25$	wyśmienity
0	równoboczny

Kryteria oceny jakości siatki

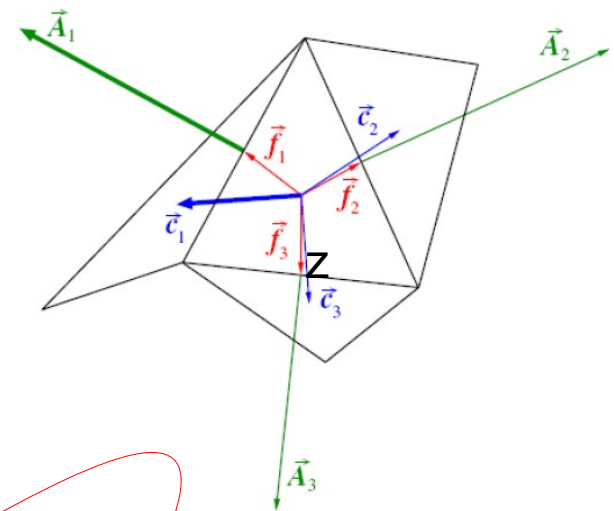
Kryteria oceny jakości siatki (wg dokumentacji ANSYS Meshing):

- **Orthogonal Quality** – wskaźnik kształtu obliczany na podstawie charakterystycznych wektorów. Im wartość bliższa 1 tym lepiej.

$\vec{A}_i$ - wektor normalny do powierzchni komórki

$\vec{c}_i$ - wektor powstały przez połączenie środka ciężkości komórki ze środkami ciężkości komórek sąsiednich

$\vec{f}_i$ - wektor powstały przez połączenie środka ciężkości komórki i środków ciężkości powierzchni ograniczających tę komórkę



$$\min[\cos(\vec{A}_i, \vec{c}_i), \cos(\vec{A}_i, \vec{f}_i)]$$

Mniejsza z tych wartości jest wskaźnikiem prostopadłości.

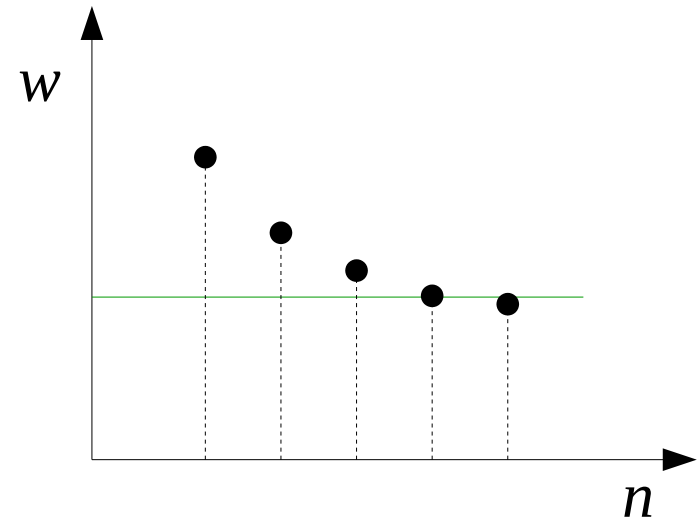
Test siatki

Test siatki – przeprowadzenie serii symulacji numerycznych dla kilku rodzajów/gęstości siatek w celu znalezienia optymalnego jej rodzaju i rozmiaru.

Kroki:

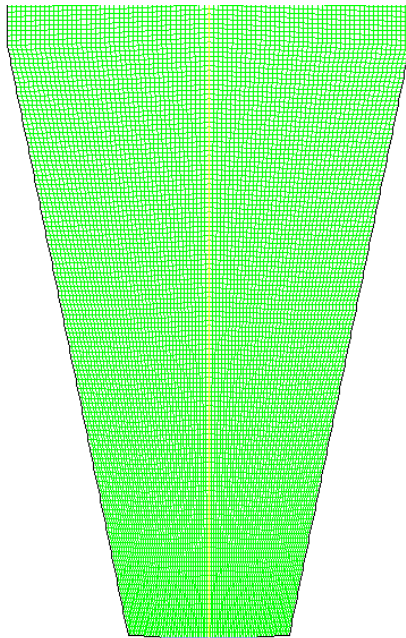
Dotyczy każdego aspektu modelowania numerycznego!

- zapoznać się z literaturą i poszukać informacji o modelowaniu podobnych zagadnień (szukać informacji o siatce)
- opracować najlepszą możliwą siatkę pod względem struktury i wskaźników jakości
- opracować kilka wariantów siatki numerycznej różniących się liczbą komórek (n)
- wytypować wskaźnik (w) charakteryzujący dany przepływ, np. siłę oporu na elemencie
- wykonać symulację **przy takich samych ustawieniach modelu** dla różnych gęstości siatek
- porównać wyniki i ocenić zmienność wskaźnika charakteryzującego przepływ w kontekście czasu obliczeń

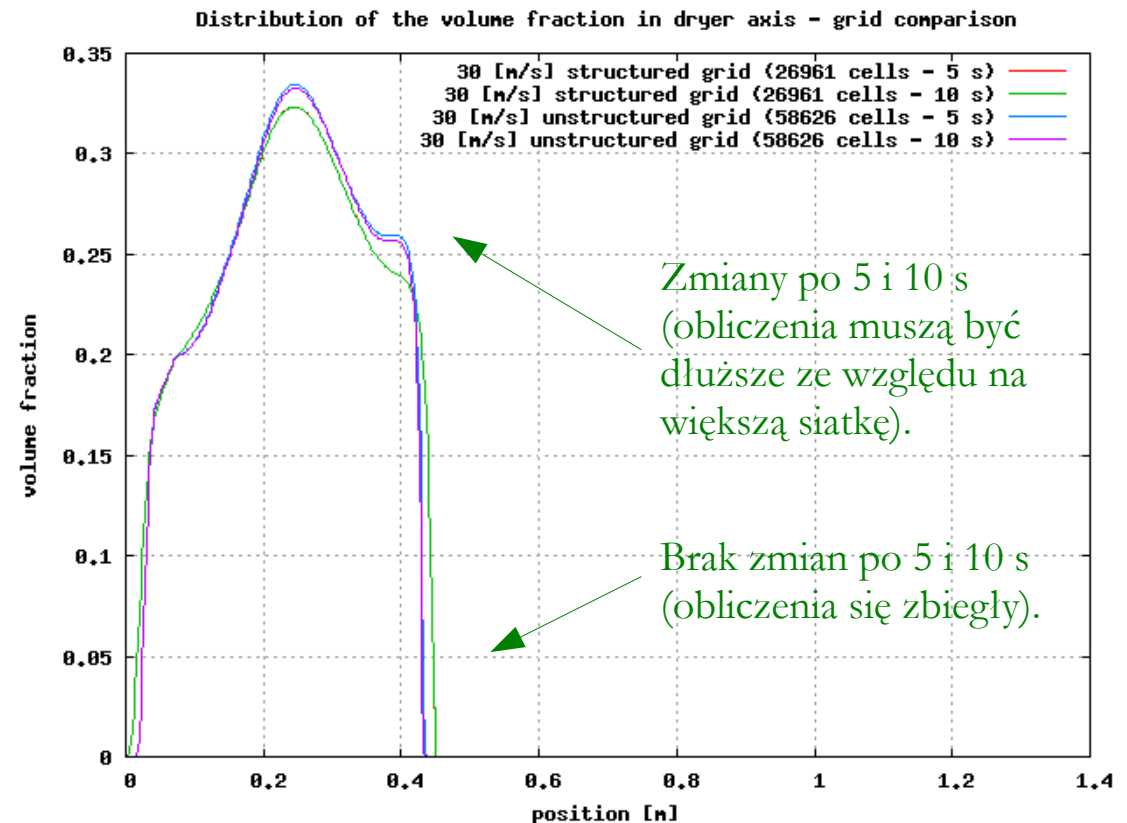


Na tym etapie model powinien być już dość dobrze dopracowany

Test siatki

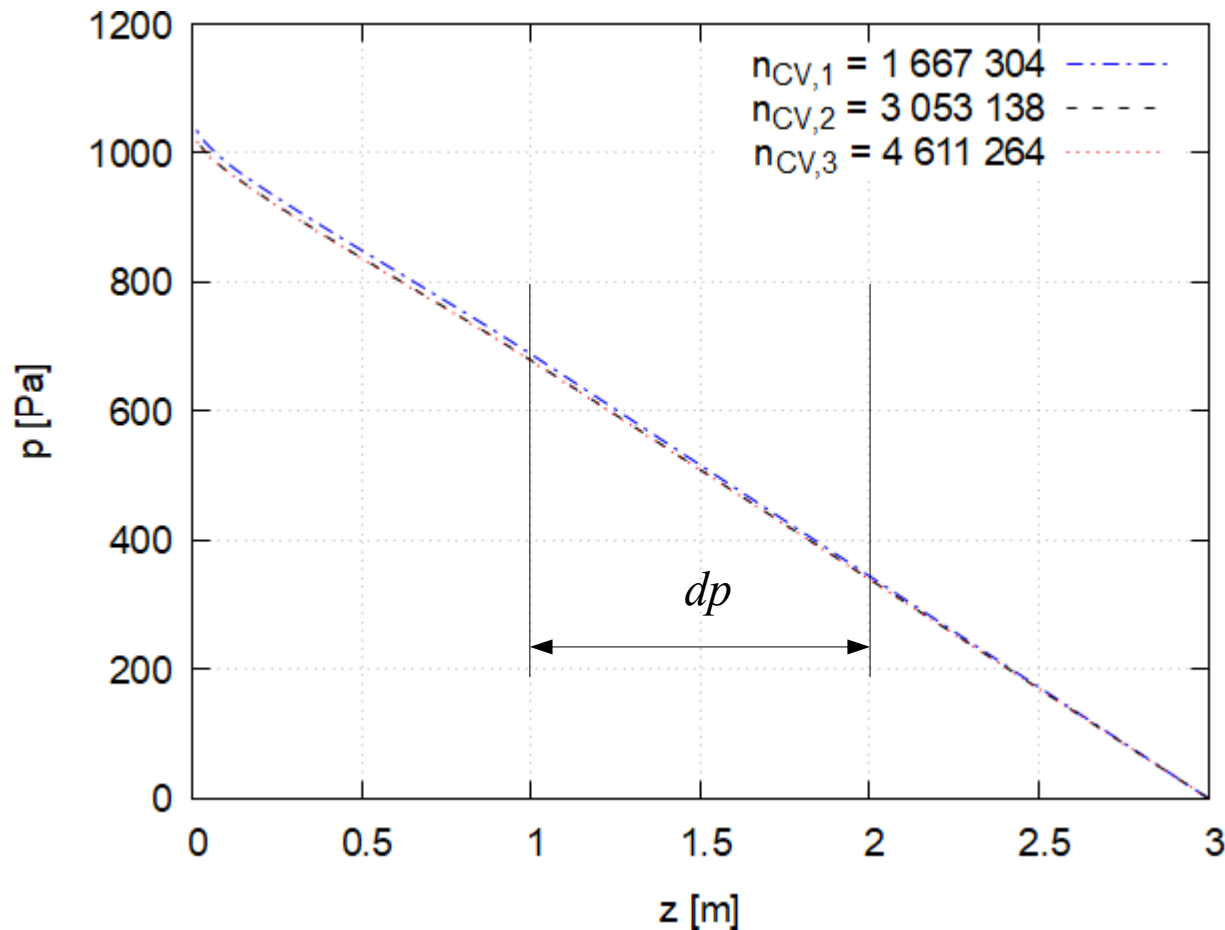


Siatka strukturalna
(26961 komórek).



Przykład testu siatki dla modelu suszarki fontannowej
(tu wskaźnikiem charakteryzującym model jest wysokość fontanny).

Test siatki



Orthogonal quality = 0.44 , 0.57 , 0.47

Skewness = 0.56 , 0.60 , 0.65

$$dp_1 = 344.23 \quad \delta_1 = 5.18 \%$$

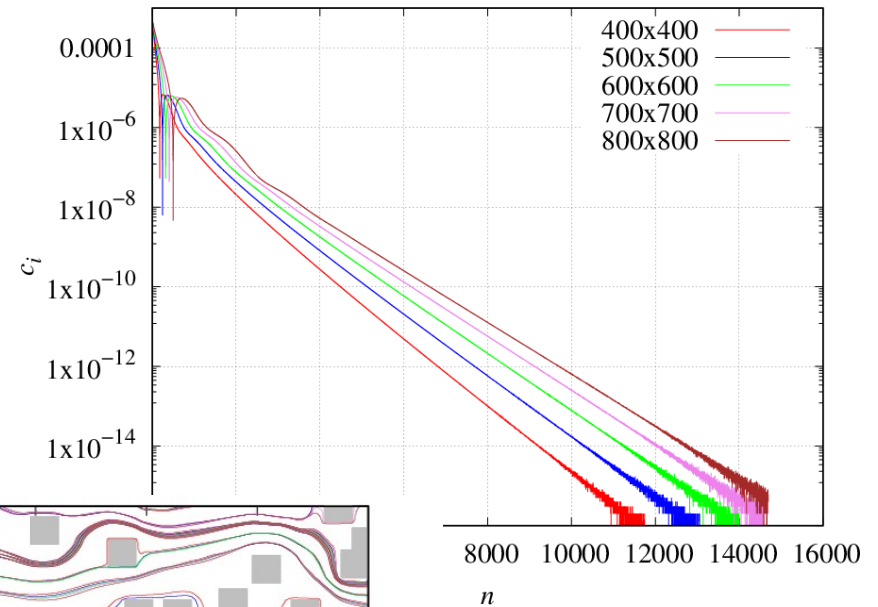
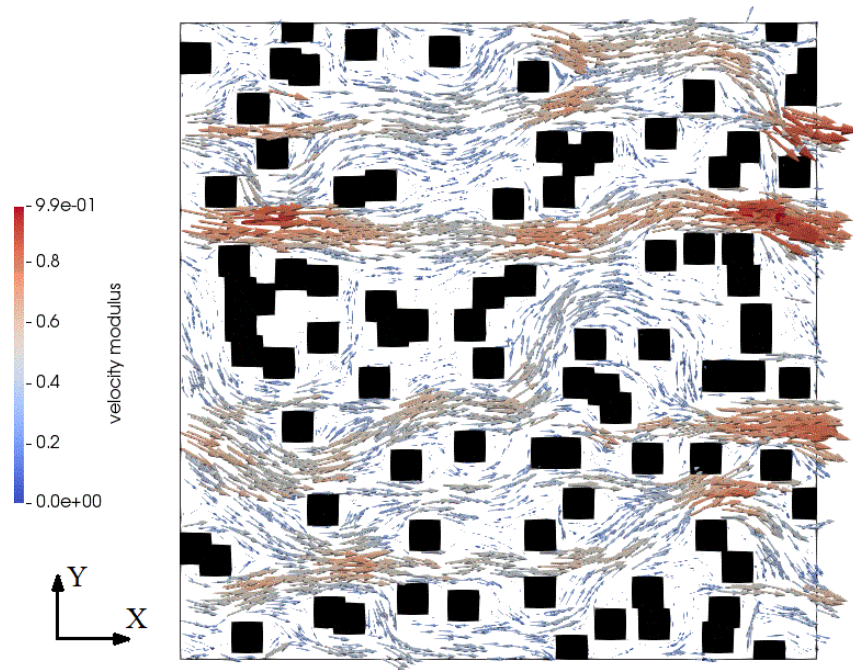
$$dp_2 = 339.13 \quad \delta_2 = 3.63 \%$$

$$dp_3 = 338.65 \quad \delta_3 = 3.48 \%$$

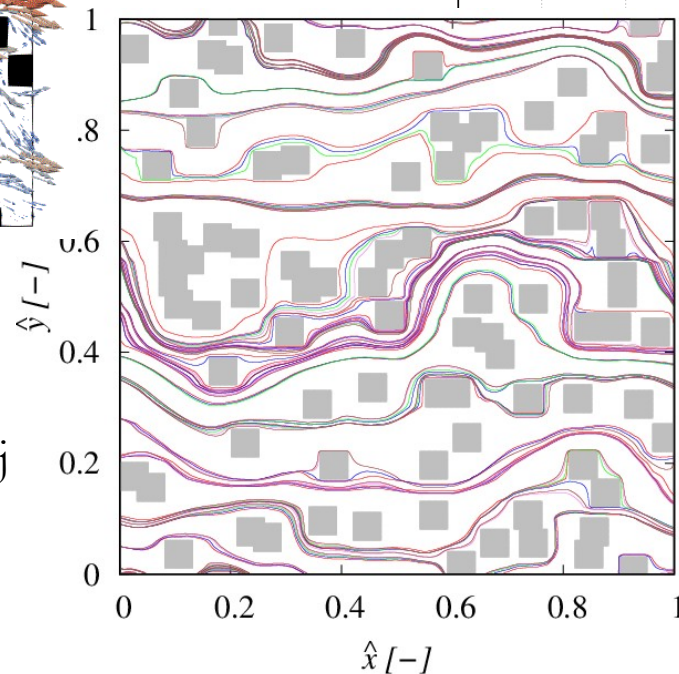
Błąd w stosunku do
rozwiązania analitycznego

Przykład testu siatki w modelu przeznaczonym do obliczania spadków ciśnień w rurze kołowej (tu wskaźnikiem charakteryzującym model jest spadek ciśnienia).

Test siatki



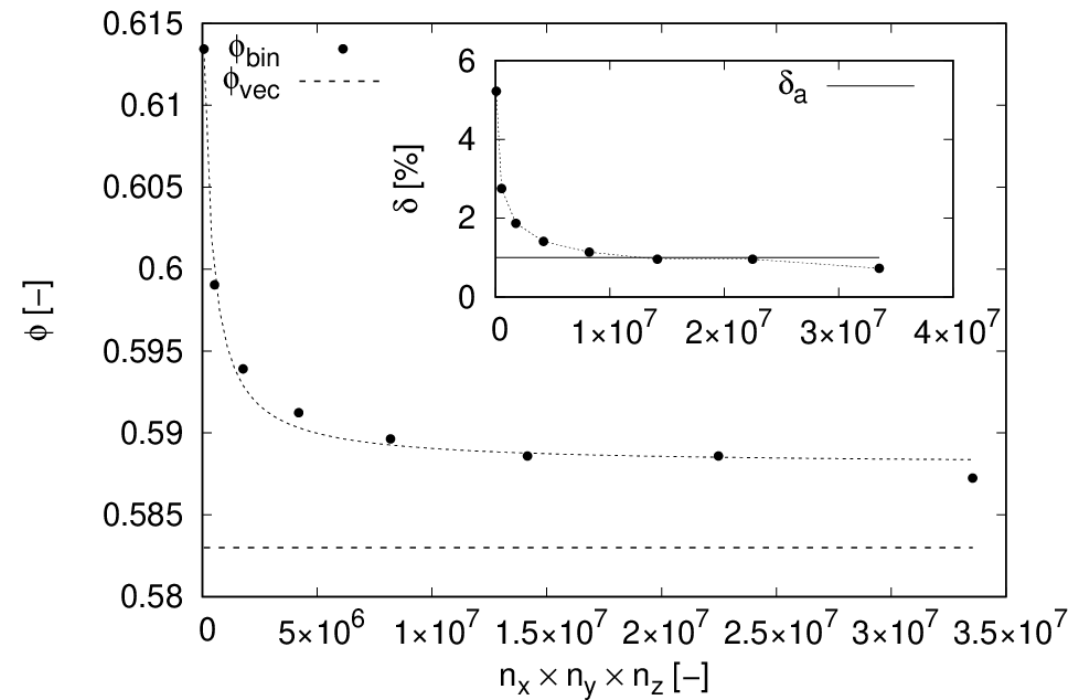
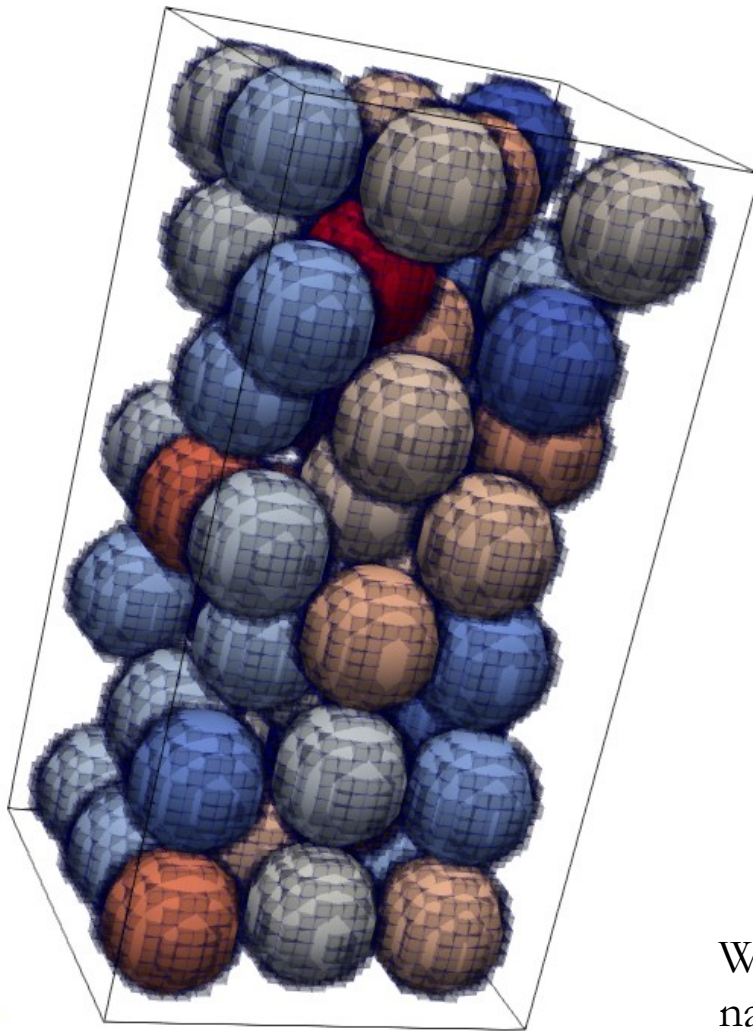
Wpływu rozdzielczości siatki binarnej
na przebieg linii prądu (krętości)
[Wojciech Sobieski, kod własny].



$n_r = 4$ $n_r = 5$ $n_r = 6$ $n_r = 7$ $n_r = 8$

Tu wskaźnikiem
charakteryzującym
model jest
długość ścieżki.

Test siatki



Wpływu rozdzielczości konwersji typu geometrii na porowatość siatki binarnej [Wojciech Sobieski, kod własny] (uu wskaźnikiem charakteryzującym model jest porowatość).



UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN
The Faculty of Technical Sciences
POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11
tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55
URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)



Dziękuję za uwagę

Wojciech Sobieski

Olsztyn, 2003-2026