

XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2022

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

Propagacja niepewności i globalna analiza wrażliwości w modelowaniu ściany brzucha z wszczepioną siatką chirurgiczną

Katarzyna Szepietowska¹, Izabela Lubowiecka¹

¹Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska
Email: katszepi@pg.edu.pl, lubow@pg.edu.pl

STRESZCZENIE: Badania dotyczą modelowania układu ściany brzucha ze wszczepioną siatką chirurgiczną w kontekście leczenia przepuklin brzusznych. Pomimo dostępności na rynku wielu siatek chirurgicznych o różnorodnych właściwościach, chirurdzy wciąż borykają się z problemami nawrotów przepuklin. Symulacje komputerowe mogą być wykorzystane do tak zwanych prób *in silico* w celu poprawy efektywności leczenia przepuklin brzusznych i optymalizacji m.in. wyboru implantu. W tym celu potrzebny jest wiarygodny model obliczeniowy układu ściany brzucha z implantem. Jednak jednym z problemów w modelowaniu są niepewności różnego pochodzenia, np. wynikające z naturalnej różnorodności właściwości ściany brzucha. Praca dotyczy uwzględnienia niepewności wybranych parametrów modelu i badania ich wpływu na odpowiedź modelu. W pracy zastosowano podejście probabilistyczne gdzie niepewne parametry potraktowano jako zmienne losowe. Stosując nieinwazyjną metodę rozwinięcia w chaos wielomianowy propagowano niepewności oraz wyznaczono współczynniki Sobola, które są miarą globalnej wrażliwości. Przedstawiono wyniki dla kilku zestawów zmiennych losowych. Dla każdego wariantu wyłoniono najważniejsze zmienne i zmienne, których niepewność ma pomijalny wpływ na wariancję wyniku modelu.

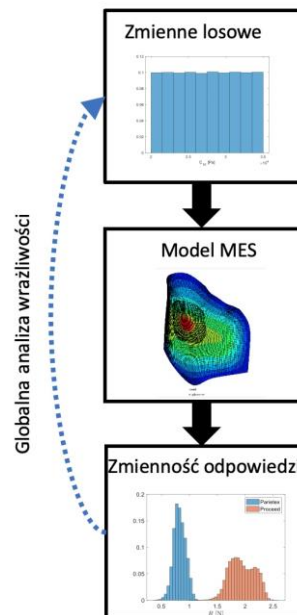
SŁOWA KLUCZOWE: metoda rozwinięcia w chaos wielomianowy, przepuklina, współczynniki Sobola, biomechanika, metoda elementów skończonych

1. Wstęp

Praca dotyczy mechanicznego podejścia do problematyki leczenia przepuklin brzusznych z użyciem siatek chirurgicznych. Uważa się, że kluczem do poprawy efektywności leczenia jest uzyskanie odpowiedniej mechanicznej kompatybilności pomiędzy siatką chirurgiczną a ścianą brzucha [1]. Badania nad zachowaniem zarówno ściany brzucha jak i siatek chirurgicznych zostały podsumowane w pracy przeglądowej [2] gdzie Deeken i Lake wskazują na potrzebę dalszych badań nad wiarygodnym modelem obliczeniowym ściany brzucha. Modele obliczeniowe mogą pomóc zrozumieć mechanikę układu ściany brzucha z implantem oraz posłużyć w tak zwanych badaniach *in silico* i optymalizacji np. siatki chirurgicznej. Problemem w modelowaniu są jednak niepewności wynikające m.in. z naturalnej różnorodności właściwości mechanicznych materiału, niedokładności modelu, błędów i braku wystarczającej wiedzy o pewnych parametrach modelu. Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu niepewności wybranych parametrów modelu na odpowiedź numerycznego modelu modelu ściany brzucha z implantem.

2. Metodologia

W pracy wykorzystano metodologię którą przyjęto wcześniej do propagacji niepewności w przypadku modelu implantu wraz z warunkami brzegowymi wynikającymi z jego umiejscowienia w ścianie brzucha [3] (bez ściany brzucha) i modelu zdrowej ściany brzucha [4]: Schemat metodologii przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat propagacji niepewności

Zastosowano podejście probabilistyczne w którym niepewne parametry modelu traktuje się jako zmienne losowe. Wykorzystano metodę rozwinięcia w chaos wielomianowy w wariancie opartym na regresji [5]. Jest to metoda nieinwazyjna tzn. pozwala na propagację niepewności w przypadku modeli typu „czarna skrzynka”, np. modeli zbudowanych przy użyciu komercyjnego

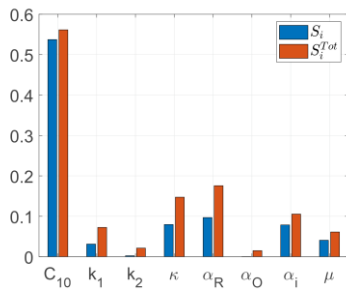
oprogramowania. Metoda ta jest mniej kosztowna obliczeniowo w porównaniu z popularną metodą Monte Carlo. Aby określić wpływ niepewności zmiennych modelu na wynik symulacji przeprowadzono globalną analizę wrażliwości i obliczono współczynniki Sobola [5].

3. Modelowanie numeryczne

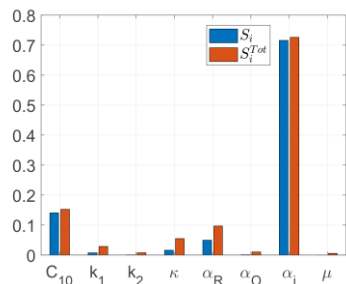
Model ściany brzucha z siatką chirurgiczną zbudowano w programie Marc (MSC. Software, Hexagon) bazującym na Metodzie Elementów Skończonych (MES). Głównym wynikiem dla którego przeprowadzone są dalsze analizy jest maksymalna siła w połączeniu implantu ze ścianą brzucha. Przyjęto anizotropowy hipersprężysty model Gassera-Ogdena-Holzapfela (GOH) [6] model materiałowy ściany brzucha i liniowo-sprężysty ortotropowy materiał siatki chirurgicznej. Przebadano kilka wariantów w których przyjęto różne zmienne losowe: parametry modelu GOH (C_{10} , k_1 , k_2 , κ), orientację włókien ściany brzucha w dwóch strefach α_R , α_O oraz implantu α_i , współczynnik tarcia pomiędzy implantem a ścianą brzucha μ oraz moduł Younga implantu w kierunku 1, E_1 i stopień ortotropii E_1/E_2 .

4. Rezultaty

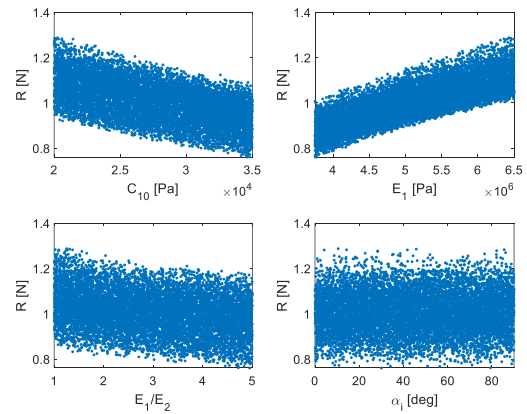
Współczynniki Sobola obliczono dla kilku wariantów zmiennych losowych. Rysunek 2 i 3 pokazują wartości współczynników w przypadku przyjęcia właściwości odpowiadających dwóm różnym komercyjnym siatkom chirurgicznym [7]. W dalszym kroku model ograniczono do zmiennych o największym wpływie w tych przykładach: C_{10} i orientacji implantu. Jednocześnie dodano nowe zmienne związane z niepewnością właściwości implantu (E_1 i E_1/E_2). Wyniki dla tego wariantu zaprezentowano w graficznej formie wykresu punktowego (rys. 4).



Rys. 2. Współczynniki Sobola pierwszego rzędu (kolor niebieski) i całkowite współczynniki Sobola (kolor czerwony) uzyskane przy przyjęciu właściwości implantu Parietex®



Rys. 3. Współczynniki Sobola pierwszego rzędu i całkowite współczynniki Sobola uzyskane przy przyjęciu właściwości implantu Proceed®



Rys. 4. Wykres punktowy (scatter plot) ilustrujący wrażliwość wyniku na niepewność poszczególnych zmiennych

5. Podsumowanie

- 1) Zastosowanie metody rozwinięcia w chaos wielomianowy pozwoliło efektywnie ocenić wpływ niepewności parametrów modelu układu ściany brzucha z implantem na odpowiedź modelu. Zbadano kilka wariantów zestawów zmiennych losowych.
- 2) Współczynniki Sobola oraz ranking zmiennych różnią się w zależności od przyjętych właściwości implantu syntetycznego.
- 3) Gdy uznamy moduł Younga implantu E_1 za zmienną losową, to ta wielkość ma największy (pośród rozważanych zmiennych modelu) wpływ na niepewność maksymalnej siły w połączeniu implantu z tkanką.

Badania wykonano w ramach projektu UMO-2017/27/B/ST8/02518 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Obliczenia wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.

Literatura

- [1] Todros S., Pavan P.G., Pachera P., Natali A.N., *Synthetic surgical meshes used in abdominal wall surgery: Part II-Biomechanical aspects*, Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials Vol. 105, No. 4, pp. 892-903, 2017.
- [2] Deeken C.R., Lake S.P., *Mechanical properties of the abdominal wall and biomaterials utilized for hernia repair*, Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, Vol. 74, pp. 411-427, 2017.
- [3] Szepletowska K., Magnain B., Lubowiecka I., Florentin E., *Sensitivity analysis based on non-intrusive regression-based polynomial chaos expansion for surgical mesh modelling*, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 57, No. 3, pp. 1391-1409, 2018.
- [4] Szepletowska K., Lubowiecka I., Magnain B., Florentin E., *Modelling of Abdominal Wall Under Uncertainty of Material Properties*, Modelling of Abdominal Wall Under Uncertainty of Material Properties. In: Ateshian, G., Myers, K., Tavares, J. (eds) Computer Methods, Imaging and Visualization in Biomechanics and Biomedical Engineering. CMBBE 2019, Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics, vol 36. Springer, Cham, 2020.
- [5] Sudret B., *Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions.*, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 93, No. 7, pp. 964-979, 2018.
- [6] Gasser T.C., Ogden R.W., Holzapfel G.A., *Hyperelastic modelling of arterial layers with distributed collagen fibre orientations*, Journal of the Royal Society Interface, Vol. 3, No. 6, pp. 15-35, 2006.
- [7] Szepletowska K., Lubowiecka I., *Finite element- and meta-modelling of abdominal wall with an implanted hernia mesh*, 24th International Conference on Computer Methods in Mechanics (CMM) and the 42nd Solid Mechanics Conference (SolMech), Świnoujście 2022.