

AUTOREFERAT

1. Osiągnięcia naukowe, dydaktyczne i organizacyjne przed doktoratem

1.1 Praca naukowa

Przed doktoratem moja praca naukowa skupiona była głównie wokół zagadnień dynamiki ciała sztywnego i powłok sprężystych w kontekście modelowania matematycznego, algorytmów całkowania równań ruchu i symulacji komputerowych opartych na metodzie elementów skończonych (MES). Zasadniczą trudność sformułowania algorytmu całkowania równań dynamicznych wiązała się ze strukturą przestrzeni konfiguracyjnej analizowanych układów oraz silnie nieliniowym charakterem badanego zjawiska.

Praca doktorska dotyczyła udowodnienia prawdziwości hipotezy, że bezpośrednie zastosowanie metody opracowanej dla dynamiki ciała sztywnego do symulacji ruchu powłok było możliwe dzięki analogii w równaniach opisujących zachowanie obu wspomnianych układów. Na bazie metody Newmarka zaproponowano schemat całkowania równań ruchu, uwzględniając aktualne trendy metod numerycznych w tej tematyce. Podstawowym kierunkiem w projektowaniu schematu była możliwość jego bezpośredniego wbudowania w istniejące programy statyki powłok. W badaniach analizowano poprawność i stabilność otrzymanych rozwiązań bazując na kryterium energetycznym. Przeprowadzone poszukiwania dotyczyły pewnych aspektów nieliniowej sześcioparametrowej teorii powłok oraz problemów dynamiki konstrukcji. Osiągnięte rezultaty, zostały zaprezentowane na licznych konferencjach i sympozjach naukowych (łącznie 10 referatów) oraz opublikowane w 1 artykule i 1 rozdziale w monografii co świadczy o aktualności i nowatorskim charakterze prowadzonych badań. Także uzyskane przeze mnie w tym okresie 4 nagrody o charakterze naukowym potwierdzają wartość i wysoki poziom prowadzonych przeze mnie badań.

W okresie przed uzyskaniem stopnia doktora pracowałam także nad symulacjami ruchu powłok w problemie modelowania konstrukcji cienkościennych i ich stateczności, gdzie poza procedurami autorskimi do obliczeń stosowano także komercyjne systemy oparte na MES. Oprócz pracy nad algorytmami całkowania równań ruchu, zajmowałam się także zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych w mechanice konstrukcji. Zainteresowania takimi metodami jak sztuczne sieci neuronowe, logika rozmyta i algorytmy genetyczne wynikły z mojego dodatkowego wykształcenia informatycznego obok studiów na kierunku

Konstrukcje Budowlane i Inżynierskie. Zainteresowania te zaowocowały publikacjami dotyczącymi wykorzystania tych narzędzi matematycznych w modelowaniu konstrukcji.

Brałam czynny udział w trzech projektach badawczych prowadzonych na Politechnice Gdańskiej oraz we współpracy z Instytutem Maszyn Przepływowych PAN, dotyczących mechaniki powłok w latach 1998-2002.

Wartość i poziom prowadzonej przeze mnie pracy naukowej oraz oryginalnych rozwiązań, które w znaczny sposób wpłynęły na rozwój mechaniki konstrukcji zostały także potwierdzona stypendium Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej (przed i po doktoracie; w sumie 2 lata), dwoma wyróżnieniami referatów przedstawianych na konferencjach tematycznych oraz prestiżową nagrodą The Young Researcher Fellowship Award for Exemplary Research in Computational Mechanics nadane przez The first M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics. Massachusetts Institute of Technology (MIT) Cambridge, MA USA.

Wszystkie opisane powyżej aspekty mojej pracy naukowej dotyczyły modelowania i symulacji komputerowych konstrukcji inżynierskich oraz oceny ich poprawności. Ta linia badawcza towarzyszyła mi także po uzyskaniu stopnia naukowego doktora. Wtedy to wyróżniły się główne interesujące mnie nurty modelowania matematycznego i symulacji numerycznych, które od poziomu bardzo szczegółowego, jak ciało sztywne i powłoka sprężysta rozwinęło się do modelowania i symulacji na poziomie całej konstrukcji inżynierskiej (np. budowle zabytkowe), modelowania i symulacji zachowania konstrukcji biomechanicznych (implanty chirurgiczne) oraz modelowania materiałowego.

1.2 Osiągnięcia dydaktyczne

W ramach działalności dydaktycznej na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Gdańskiej zajmowałam się nauczaniem przedmiotów z dziedziny mechaniki i informatyki. Ponadto od 1999 roku prowadziłam zajęcia dydaktyczne z Mechaniki Nieliniowej na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej.

Istotnym osiągnięciem dydaktycznym było przygotowanie skryptu dydaktycznego dla studentów do nauki mechaniki budowli „Zadania z mechaniki budowli”. Wartość i poziom mojej działalności dydaktycznej została uhonorowana trzema nagrodami Rektora Politechniki Gdańskiej za Wyróżniającą się Działalność Dydaktyczną: indywidualną II stopnia za rok akademicki 1999/2000 oraz III stopnia za lata 1996/1997 oraz 1998/1999.

1.3 Osiągnięcia popularyzatorskie i organizacyjne

Jeszcze jako asystent pracowałam przy organizacji dwu konferencji o zasięgu międzynarodowym The 6th Conference SSTA2002 „Shell Structures. Theory and Application” Gdańsk-Jurata 1998 (w latach 1997-1998) oraz The 7th Conference SSTA2002 „Shell Structures. Theory and Application” Gdańsk-Jurata 2002 (w latach 2001-2002).

Przygotowałam i prowadziłam seminarium dla pracowników i studentów Wydziału dotyczące sieci neuronowych w mechanice konstrukcji. Ponadto przygotowałam i administrowałam stroną internetową Katedry Mechaniki Budowli PG w latach 1999-2007.

2. Osiągnięcia naukowe po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora moje zainteresowania badawcze obok dynamiki ciała sztywnego i powłok sprężystych rozwijały się w kierunku konstrukcji o charakterze bardziej złożonym tak geometrycznie jak i materiałowo, jak konstrukcje zabytkowe (np. mostowe) i struktury biomechaniczne. To przyniosło nowe wyzwania w dziedzinie modelowania matematycznego i symulacji numerycznych zachowania badanych obiektów. Poza budowaniem modelu matematycznego i symulacji numerycznej skupiono się na ocenie jego poprawności oraz porównaniu wyników symulacyjnych z tymi uzyskanymi na drodze pomiarów i eksperymentów. Rozwój taki wynikał bezpośrednio z konieczności zastosowania metod modelowania, nad którymi pracowałam wcześniej do analiz układów mechanicznych, złożonych pod względem materiałowym i strukturalnym a także funkcjonującym w warunkach trudnych do odtworzenia w modelu matematycznym i fizycznym, jak np. wszczepione implanty chirurgiczne, czy zniszczone konstrukcje zabytkowe.

W trakcie pracy badawczej odbyłam cztery staże zagraniczne, w Wielkiej Brytanii, Hiszpanii (2 razy) oraz Francji, co pozwoliło mi nawiązać współpracę, zauważyć najbardziej aktualne trendy w badaniach naukowych w Europie i zaowocowało publikacjami indeksowanymi na liście JCR. W moim dorobku po doktoracie mam 1 monografię, 12 artykułów z listy JCR, 10 rozdziałów w monografiach, 32 referaty konferencyjne i 4 referaty zapraszone. Brałam czynny udział w 17 konferencjach w kraju i za granicą, gdzie przedstawiałam swoje osiągnięcia naukowe.

Brałam udział w 6 projektach badawczych krajowych i międzynarodowych, w tym w trzech finansowanych z funduszy europejskich oraz prowadzonych we współpracy z takimi instytucjami jak Gdański Uniwersytet Medyczny lub Instytut Maszyn Przepływowych PAN.

Prowadzone przeze mnie badania naukowe zostały nagrodzone Pierwszą Nagrodą Komitetu Mechaniki Polskiej Akademii Nauk (2005); Nagrodą im. Wacława Olszaka Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej (2005); Nagrodą Rektora Politechniki Gdańskiej (2005) a praca doktorska została wyróżniona przez Radę Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Gdańskiej (2002) i przez Ministra Infrastruktury (2004).

2.1 Opis osiągnięcia stanowiącego podstawę wniosku

2.2.1 Tytuł osiągnięcia:

Wybrane problemy modelowania matematycznego i symulacji struktur inżynierskich i biomechanicznych

Prezentowany cykl prac dotyczy problemów modelowania matematycznego struktur o charakterze inżynierskim i biomechanicznym w kontekście budowania metodologii symulacji numerycznej ich zachowania na bazie metody elementów skończonych (MES). Obejmuje on modelowanie geometrii, modelowanie materiałowe oraz analizę statyczną i dynamiczną rozpatrywanych struktur.

W pracy badawczej uwagę skupiono na następujących grupach problemów:

- 1) modelowanie geometrii struktur inżynierskich i biomechanicznych oparte na danych uzyskanych z badań optometrycznych (prace [1, 2, 5, 9, 10]);
- 2) modelowanie materiałowe o charakterze liniowym i nieliniowym (prace [6, 11, 12]);
- 3) modele struktur inżynierskich i biomechanicznych oparte na metodzie elementów skończonych (prace [1-8, 11, 12]);
- 4) symulacja i weryfikacja proponowanych modeli matematycznych (prace [5-7, 11, 12]).

Prace [1-2, 5] związane są z modelowaniem zabytkowych konstrukcji inżynierskich oraz oceną ich zachowania się pod wpływem działających na nie obciążeń. Głównym celem badań było opracowanie nowatorskiej metodologii modelowania i symulacji komputerowej konstrukcji istniejącej, nieudokumentowanej projektowo, gdzie stosuje się metody optometryczne. Do modelowania geometrii oraz materiału wykorzystane zostały dane uzyskane przy użyciu metod takich, jak skanowanie laserowe i fotogrametria a do oceny budowy wewnętrznej konstrukcji mającej wpływ na modelowanie materiału wykorzystano georadar (GPR). Dwie z wymienionych wyżej technik (skanowanie laserowe i georadar)

w zastosowaniu do analizowanej problematyki stanowią nowe, nie stosowane wcześniej podejście do analizy konstrukcji inżynierskiej. Podobne metody optometryczne zastosowano w kolejnych pracach dotyczących modelowania struktur biomechanicznych [9, 10] (wszczepionych implantów przepuklinowych) gdzie ze względu na dużą nieregularność rozpatrywanych geometrii nie było możliwe standardowe modelowanie 3D. Dotyczyło to w szczególności geometrii przedniej ściany jamy brzusznej człowieka. Głównym celem tych badań było opracowanie modelu matematycznego wszczepionej siatki chirurgicznej pozwalającego na ocenę wytrzymałości połączenia implantu z tkanką. Zaproponowana metodologia oceny nośności takiego połączenia jest nowatorskim podejściem w biomechanice i pomimo wagi problemu efektywności operacji przepuklin nie była wcześniej dyskutowana w literaturze.

Przygotowane na bazie danym optometrycznych geometrie wykorzystano do zbudowania modeli opartych na MES a symulacje numeryczne pozwoliły zweryfikować proponowane modele matematyczne. Wyniki symulacji zachowania analizowanych struktur poddanych działającym na nie obciążeniom oceniano na podstawie obserwacji zachowania konstrukcji istniejących (np. lokalizacja zarysowań) [5] lub porównywano z wynikami specjalnie zaprojektowanych eksperymentów [6-8, 11, 12]. W prowadzonych badaniach istotną uwagę poświęcono modelowaniu materiałowemu analizowanych konstrukcji. W przypadku tych istniejących dotyczyło to głównie oceny struktury materiału na podstawie badań GPR [2, 5]. W innych pracach, jak np. [6], dotyczyło to identyfikacji parametrów modeli materiałowych nieliniowo sprężystych na podstawie danych rozciągania osiowego i czystego ścinania wraz z ich weryfikacją wykonaną poprzez porównanie wyników symulacji i specjalnie przygotowanego eksperymentu. Podobnie w przypadku badań dotyczących implantów badano zachowanie proponowanych modeli matematycznych uwzględniających liniowe [4, 7] i nieliniowe [11, 12] modele materiałów siatek chirurgicznych. W zależności od rodzaju implantu materiał siatek traktowano jako ciało izotropowe lub ortotropowe. W przypadku siatek plecionych stosowano model sieci gęstej. Model ten pozwala zastosować w symulacji, zidentyfikowane na podstawie rozciągania jednoosiowego, funkcje konstytutywne w dwu ortogonalnych kierunkach materiału tkaniny technicznej. We wspomnianych pracach symulacje zachowania badanych struktur z uwzględnieniem zidentyfikowanych modeli materiałowych posłużyły do oceny poprawności zastosowanego podejścia. W badaniach nad proponowanymi modelami matematycznymi i ich weryfikacją stosowano analizę parametryczną i analizę wrażliwości [1, 3, 5, 11]. Zaproponowane modele matematyczne wszczepionych implantów wykorzystano do planowania sposobu implantacji siatki przepuklinowej, co stanowiło podstawę opracowania pierwszego na świecie, innowacyjnego systemu wspomagania

chirurga "HAL2010". System "HAL2010" powstał jako produkt końcowy projektu „Optymalizacja leczenia przepuklin brzusznych z zastosowaniem implantów syntetycznych” finansowanego z funduszy Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka przy współpracy Politechniki Gdańskiej i Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego.

2.2.2 Szczegółowe omówienie zakresu poszczególnych prac

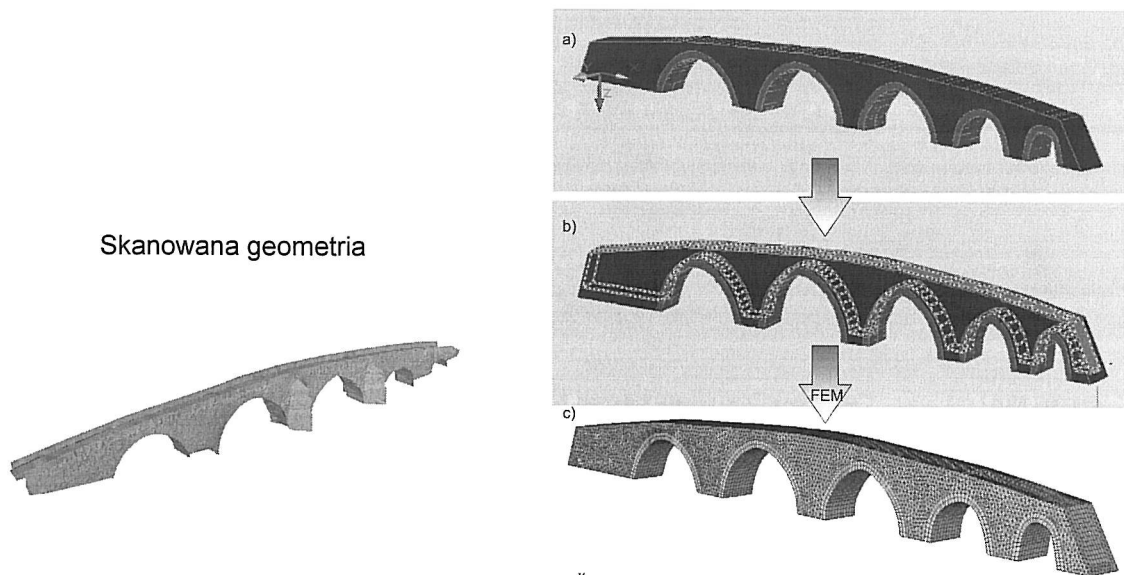
W badaniach dotyczących zabytkowych konstrukcji inżynierskich, po wykonaniu obróbki danych pomiarowych zaproponowano różne modele matematyczne oparte na MES, które poddano analizie dynamicznej [1-2] i statycznej [5].

Do analizy struktury badanej konstrukcji wykorzystano georadar (GPR). Analiza sygnału radarowego pomogła w oszacowaniu modelu materiału konstrukcji i określeniu jego parametrów. Modelowanie materiałowe w sytuacji, gdy nie są znane dokładne własności mechaniczne stosowanych materiałów, jak to ma miejsce w budowlach zabytkowych, i gdy nie można stosować badań niszczących jest trudnym problemem, a jednocześnie istotnym z punktu widzenia wiarygodności symulacji komputerowej zachowania się konstrukcji. Wpływ poszczególnych parametrów modelu materiału na wyniki analizy konstrukcji oszacowano na podstawie analizy wrażliwości [1, 5], której wyniki pozwoliły na ustalenie ich znaczenia w modelowaniu.

W pracy [1], dane geometryczne o konstrukcji pochodzące ze skanowania laserowego. Wykonano analizę modalną zaproponowanego modelu, która wykazała, że uzyskane w symulacji częstości i postaci drgań własnych konstrukcji odpowiadają tym znanym z literatury dla tego typu konstrukcji kamiennej. Pozwoliło to na weryfikację modelowania. Ponadto zaobserwowano, że wartość przyjętego modułu sprężystości jest istotnym parametrem wpływającym na zachowanie badanego modelu. Oznacza to, że zastosowanie radaru do dokładnej oceny budulca jest bardzo istotne z punktu widzenia poprawnego modelowania, gdyż może znacznie wpłynąć na uzyskane z symulacji rezultaty.

W pracy [5] zastosowano dane uzyskane przy pomocy fotogrametrii w celu uzyskania informacji do modelowania 3D i oceny zachowania tej samej zabytkowej konstrukcji mostowej. Ponadto podobnie jak poprzednio użyto danych uzyskanych z testów wykonanych przy pomocy georadaru (GPR). To wszystko pozwoliło na zaproponowanie i symulację zachowania dwu kolejnych modeli analizowanej konstrukcji opartych na MES (Rys. 1). Symulacje dotyczyły zachowania konstrukcji pod działaniem różnych rodzajów obciążenia mogących powodować uszkodzenia. Pierwszy, uproszczony model był bardziej efektywny z uwagi na czas symulacji jednak niewystarczający jeśli chodzi o identyfikację potencjalnych uszkodzeń. Drugi model, bardziej skomplikowany i kosztowny obliczeniowo

lepiej opisywał zachowanie badanego obiektu i pozwalał na nakreślenie wniosków co do przyczyn istniejących zarysowań. Analiza stanu naprężeń i odkształceń pozwoliła stwierdzić na ile istniejący ruch kołowy oraz osiadanie podpór wywołane zmianą biegu rzeki wpływa na wykryte uszkodzenia mostu.



Rys. 1 Modelowanie konstrukcji inżynierskiej (z prawej) na podstawie geometrii ze skanowania laserowego (z lewej)

W przypadku analizowanej w pracach [1] i [5] konstrukcji mostowej, porównanie wyników symulacji komputerowej proponowanych modeli poddanych działaniu obciążenia pochodzącego od ruchu kołowego oraz osiadania gruntu z danymi o stanie konstrukcji takimi, jak np. lokalizacja zarysowań, stanowiła podstawę oceny poprawności modelowania.

Podobną metodologię bazującą na wykorzystaniu metod optometrycznych do zbudowania modelu istniejącej konstrukcji wykorzystano w pracy [2], dotyczącej istniejącej drewnianej konstrukcji kratowej stanowiącej element zabytkowego dachu. W pracy zdefiniowano dwa modele MES kratownicy a do ich porównania wykorzystano analizę modalną. W pracy wykorzystano dane uzyskane z fotogrametrii i pokazano, że zbudowany na tej podstawie model konstrukcji nadaje się do dalszej analizy mechanicznej szczególnie opartej na MES gdzie przygotowanie modelu geometrycznego obiektu o nieregularnej geometrii jakim może być mocno zniszczony zabytek jest bardzo pracochłonne i często podlega silnym uproszczeniom. Zastosowanie metod optometrycznych pozwala w tej sytuacji na znaczne przyspieszenie modelowania i efektywną analizę.

W kolejnych pracach [4-12] wykorzystano analogiczną metodologię oraz doświadczenie zdobyte w badaniach nad konstrukcjami inżynierskimi do modelowania i analizy struktur biologicznych oraz implantów chirurgicznych. Tematyka modelowania implantów (siatek) stosowanych do naprawy przepukliny brzusznej stała się istotnym nurtem w badaniach, z uwagi na potrzeby medycyny w zakresie określenia zaleceń klinicznych co do wszczepiania implantów tak, aby unikać nawrotów choroby, które to, jak podaje literatura opisana w [3], [9-12], nadal są poważnym problemem medycznym. Implanty syntetyczne w postaci siatek chirurgicznych są mocowane do tkanki ludzkiej za pomocą łączników w postaci zszywek lub szwów. Stosowanie jak najmniejszej liczby łączników jest istotne z uwagi na komfort życia pacjenta (mniejsze możliwości zniszczenia nerwów czyli mniej bólu) ale z drugiej strony ich niewystarczająca liczba może być przyczyną zerwania połączenia implantu z powięzią i nawrotu choroby. Prowadzone badania dotyczyły siatek używanych w operacjach laparoskopowych i mocowanych z użyciem zszywek lub szwów.

Moje główne osiągnięcie w tej grupie problemów stanowiło zbudowanie i analiza zachowania modeli matematycznych bazujących na Metodzie Elementów Skończonych implantów stosowanych w operacjach przepukliny brzusznej oraz opracowanie metodologii prowadzącej do oceny efektywności przeprowadzonego zabiegu na podstawie wytrzymałości połączenia implantu z tkanką. Modele te wykorzystano do planowania sposobu implantacji siatki z uwagi na liczbę łączników, ich rozkład oraz orientację implantu zaimplementowanego w systemie wspomagania chirurga "HAL2010". Są to pierwsze tego typu modele opisane w literaturze a przeprowadzona analiza ich zachowania pod wpływem obciążeń odpowiadającym fizjologii człowieka pozwoliła na sformułowanie zaleceń klinicznych dotyczących najkorzystniejszego z punktu widzenia pacjenta sposobu implantacji siatki mających swe podstawy w mechanice. Związane jest to z analizą parametrów najistotniej wpływających na trwałość połączenia implantu z tkanką, zakresami sił, którym może podlegać wszczepiona siatka, własnościami materiałowymi samych implantów oraz kinematyką jamy brzusznej.

W ramach badań skupiono się na następujących zagadnieniach:

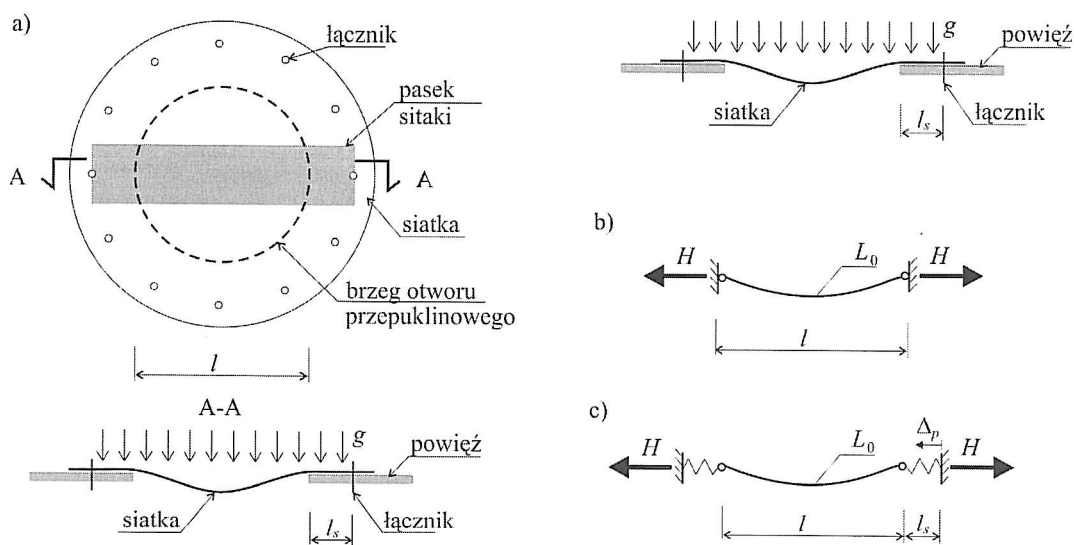
a) Modelowanie:

- modelowanie brzucha człowieka;
- modelowanie materiału siatki chirurgicznej;
- model MES wszczepionego implantu;
- symulacja zachowania modeli MES i weryfikacja ich poprawności na podstawie eksperymentów.

b) Analiza:

- analiza oddziaływania na wszczepiony implant;
- analiza modelu brzucha w celu określenia odkształceń jakim podlega podczas czynności życiowych;
- badanie zachowania implantu pod wpływem ekstremalnych sił działających na wszczepioną siatkę: ciśnienia wewnątrz-brzusznego powstającego podczas kaszlu lub skoku; wymuszeń kinematycznych wynikających z ruchów pacjenta będących wynikiem jego fizjologicznych czynności takich, jak skłony, skręty tułowia, nabieranie powietrza itp.

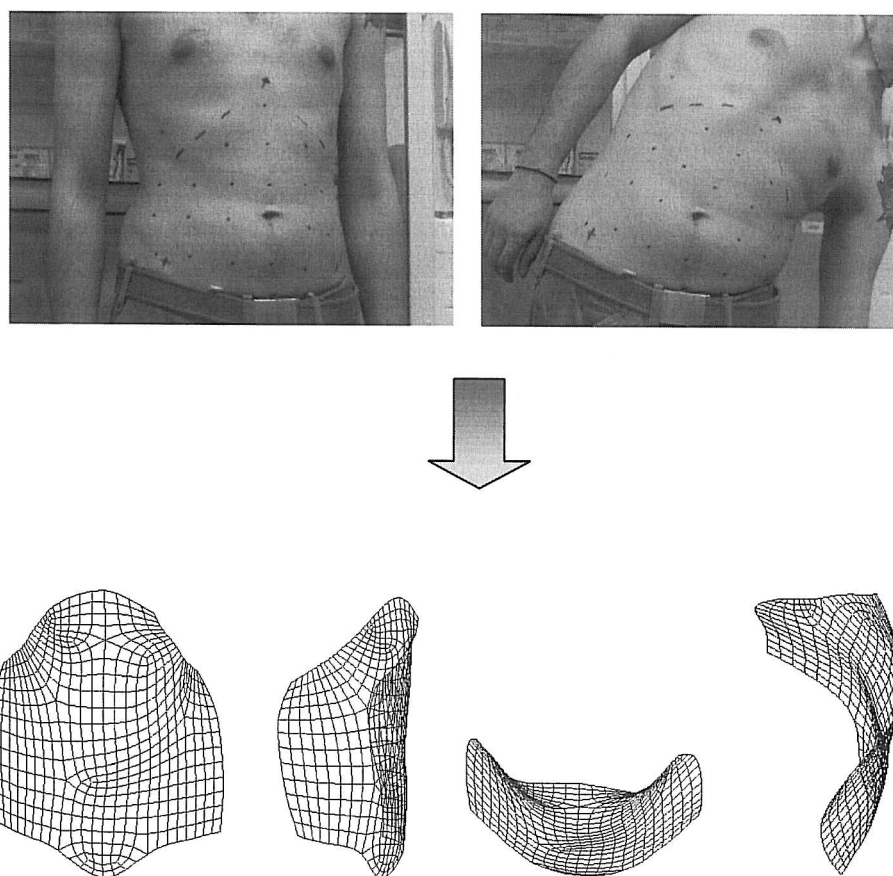
Jako pierwszy, uproszczony model implantu zastosowano model cięgna (Rys. 2a), [3]. Analizowano go w kilku wariantach podparcia: podparcie sztywne (Rys. 2b), sprężyste (Rys. 2c) oraz sprężyste z przemieszczeniem. Analizowano wpływ podstawowych parametrów układu na wartości sił reakcji i wyłoniono te o najistotniejszym znaczeniu, sztywność układu oraz wstępne napięcie implantu podczas wszczepiania. Do tego celu zastosowano analizę wrażliwości. Sformułowano wnioski dotyczące wpływu sztywności implantu oraz jego wstępnego napięcia na wartości sił w połączeniach.



Rys. 2 Model cięgowy implantu przepuklinowego

Następnie zaproponowano dwuwymiarowy model okrągłej membrany przy wykorzystaniu metody elementów skończonych, który opisano i analizowano w pracy [4].

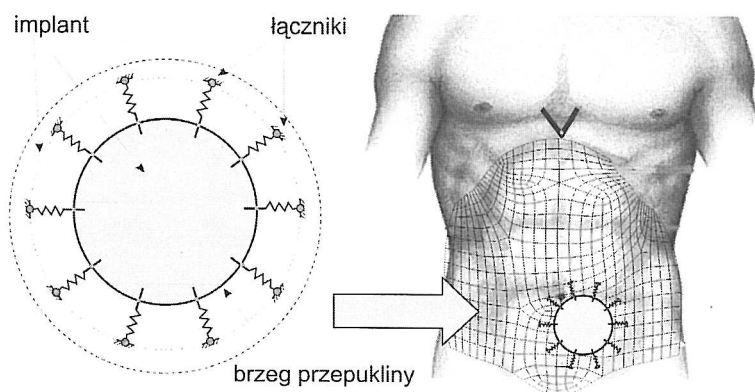
Jednocześnie zaistniała potrzeba uzyskania informacji o tym, jak aktywność życiowa człowieka, a szczególnie ruchy jego tułowia, wpływają na zachowanie wszczepionej siatki. Zatem kolejnym istotnym punktem w badaniach było stworzenie modelu powierzchni brzucha człowieka oraz analiza jego zachowania podczas czynności życiowych. W tym celu posłużono się metodologią stworzoną wcześniej do analizy konstrukcji inżynierskich bazującą na metodach optometrycznych. Analizowano dane zebrane podczas rejestracji ruchów brzucha zdrowych ludzi. Wyniki analizy przemieszczeń i odkształceń powierzchni brzucha zdrowego człowieka oraz metodologię ich badania przedstawiono w pracach [9-10]. Na podstawie zebranych danych przy pomocy specjalnie zaprojektowanych procedur matematycznych stworzono trójwymiarowy model geometrii brzucha (Rys. 3), który wykorzystano w modelowaniu opartym na metodzie elementów skończonych.



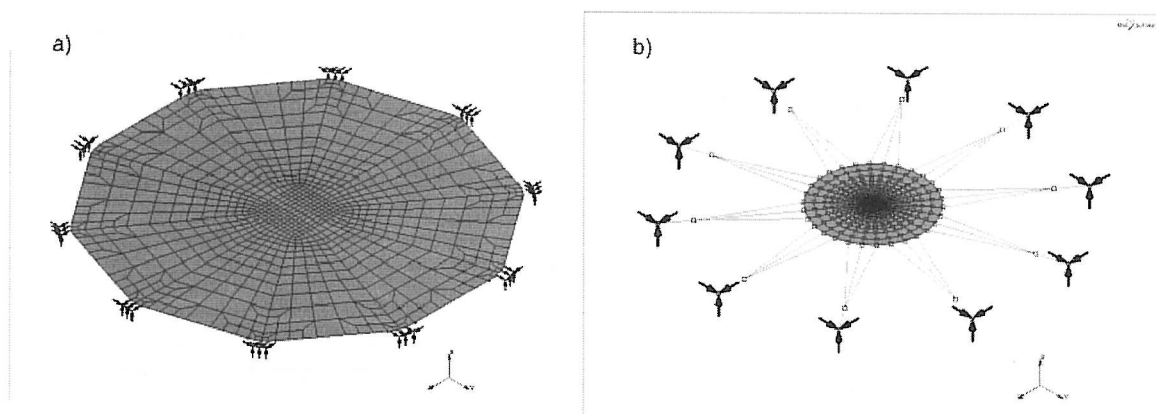
Rys.3 Model geometrii brzucha na podstawie danych uzyskanych metodami optometrycznymi

W kolejnych pracach zaproponowano modele membranowe implantu ortotropowego [7] (dla siatki jak np. DynaMesh® IPOM) i izotropowego [8] (Dualmesh Gore®) w różnych konfiguracjach łączników i w różnych wariantach podparcia szczegółowo opisanych

w wymienionych pracach (Rys. 4). Celem tych badań była ocena zastosowanego rozwiązania (naprawy przepukliny) w kontekście wytrzymałości połączenia siatki z tkanką powięzi. Jako wielkości decydujące o tym, czy operacja przepukliny będzie efektywna i nie nastąpią nawroty, wykorzystano tutaj siły powstające w połączeniu siatki chirurgicznej z tkanką. Dwa warianty modeli opartych na metodzie elementów skończonych przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 4 Model wszczepionego implantu na podporach sprężystych



Rys. 5 Model wszczepionego implantu na podporach sprężystych:

- a) wielokątny obejmujący otwór przepuklinowy i obszar oparcia siatki na ścianie jamy brzusznej; b) okrągły, gdzie membrana jest tylko w miejscu otworu a strefa wokół przepukliny modelowana jest przez podpory sprężyste

Wykonano i przedstawiono symulacje zachowania czterech stosowanych w Polsce implantów pod działaniem ciśnienia wewnątrz-brzuszego powstającego w trakcie kaszlu oraz na skutek wymuszeń kinematycznych. To ciśnienie zidentyfikowane zostało wcześniej

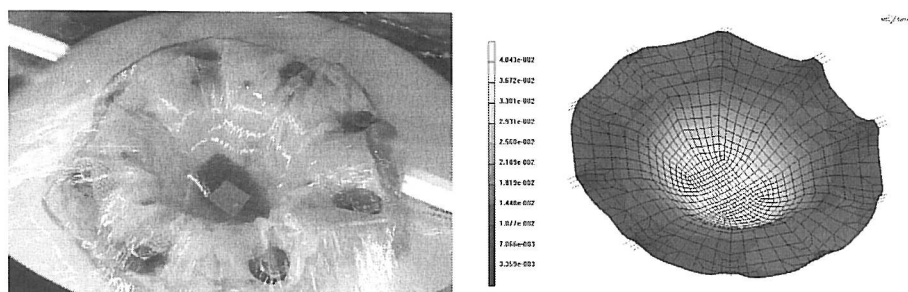
i opisane w literaturze jako czynnik mający główny wpływ na zerwanie połączenia siatki z tkanką, szczególnie w sytuacji zaraz po operacji, kiedy to implant nie jest jeszcze przerośnięty tkanką. W celu weryfikacji poprawności modelowania, przygotowano stanowisko do badań eksperymentalnych modelu fizycznego przepukliny na oddziaływania impulsowe symulujące kaszel i przeprowadzono szereg badań układu siatka-tkanka. Modele fizyczne wykonano dla różnych rodzajów siatek i różnych sposobów mocowania. Wykonano symulacje komputerowe przeprowadzonego eksperymentu. Przygotowane modele matematyczne oparte na MES poddano działaniu impulsu ciśnienia imitującego kaszel. Podczas analizy dynamicznej w modelu uwzględniono tłumienie Rayleigha, którego parametry wyznaczono na podstawie wyników analizy modalnej układu. Ze względu na dwuliniowe funkcje konstytutywne materiału siatki, przyjęte dla trzech z czterech typów implantów, oraz na duże odkształcenia i przemieszczenia jakim podlegała siatka i powięź, analiza miała geometrycznie i fizycznie nieliniowy charakter.

Najlepsze wyniki osiągnięto dla modelu implantu opartego na podłożu sprężystym uwzględniającego współpracę siatki syntetycznej z przednią ścianą jamy brzusznej (Rys. 6).



Rys. 6 Model wszczepionego implantu na podłożu sprężystym (a – rozstaw łączników; d – otwór przepuklinowy; u – obszar oparcia siatki na powłoce brzucha)

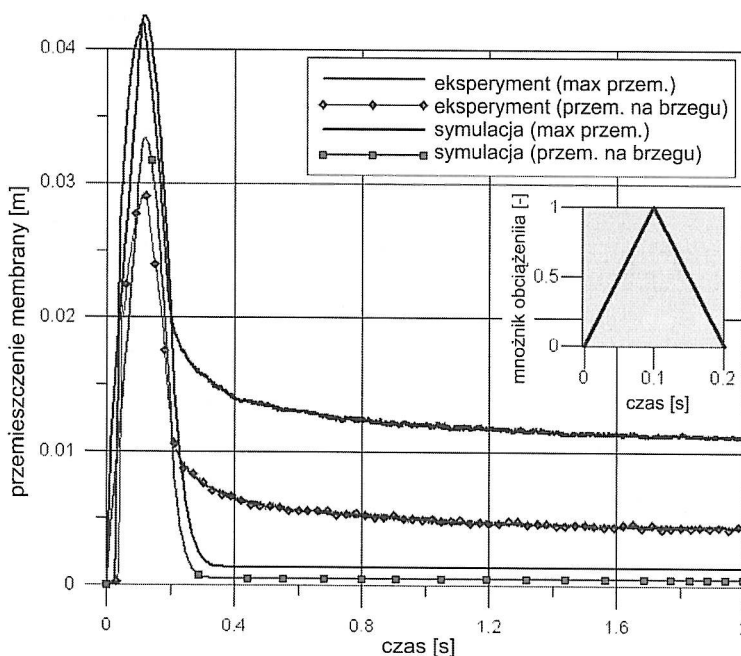
Wyniki symulacji zachowania implantu pod wpływem impulsu ciśnienia porównano z rezultatami doświadczeń (Rys.7). Stanowisko badawcze wyposażone było w komorę ciśnieniową umożliwiającą symulacje kaszlu i wyposażoną w czujniki laserowe do pomiaru przemieszczeń. Podczas eksperymentów na modelach fizycznych przepukliny w komorze, rejestrowano przemieszczenia membrany oraz działające na implant ciśnienie. Ponadto poziome przemieszczenia łączników były rejestrowane przez kamerę umieszczoną nad komorą. Uzyskane wyniki wykorzystano do dostrojenia i walidacji zaproponowanych modeli MES.



Rys. 7 Przemieszczenia implantu pod wpływem ciśnienia wewnątrz-brzusznego.

Model fizyczny i symulacja MES

Porównanie wyników eksperymentalnych i symulacji modelu MES z powyższego rysunku dla siatki Dyna Mesh® przedstawiono na Rys. 8. Wykorzystano przy tym maksymalne ugięcie membrany w środku oraz jej przemieszczenie na krawędzi otworu przepuklinowego. Ponadto badano przemieszczenia poziome łączników, które porównywano z zarejestrowanymi przez kamerę podczas doświadczenia. Dane te posłużyły do weryfikacji sprężystości tkanki wokół otworu przepuklinowego.

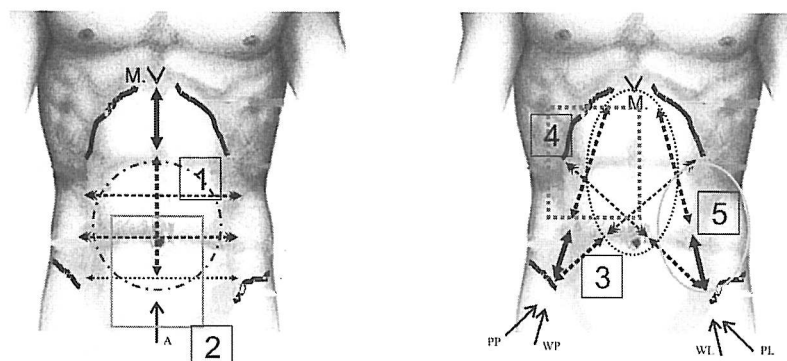


Rys. 8 Przemieszczenia implantu w porównaniu do przemieszczeń uzyskanych w symulacji modelu (implant Dyna Mesh® IPOM)

Dobra zgodność symulacji z eksperymentem świadczyła o poprawności modelowania. Zaproponowane modele matematyczne wszczepionych implantów mogą być stosowane do oceny wytrzymałości połączenia siatki z tkanką. Jako kryterium oceny zaproponowano

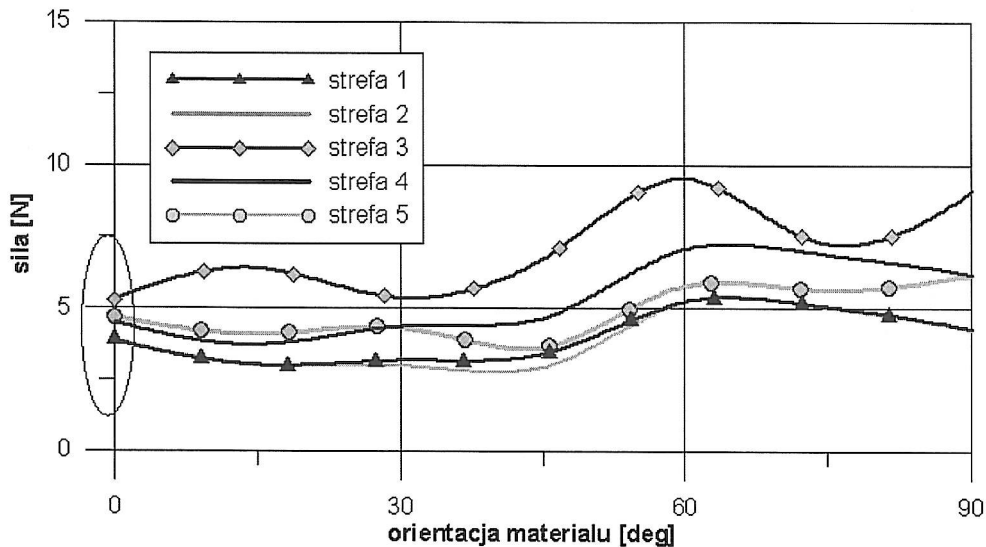
wartości sił w połączeniach implant-tkanka, które nie powinny przekraczać wartości sił niszczących w łącznikach, które zostały określone doświadczalnie dla wszystkich rozważanych rodzajów implantów i łączników.

Kolejnym etapem badań dotyczących implantów przepuklinowych była analiza zachowania wszczepionej siatki pod wpływem wymuszeń kinematycznych wynikających z normalnej aktywności człowieka.



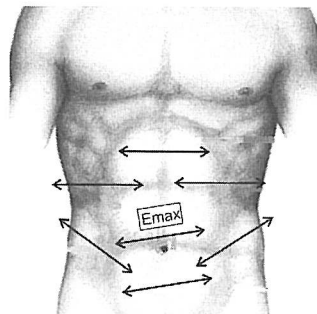
Rys. 8 Analizowane strefy implantacji siatek

Do analizy wykorzystano zakresy odkształceń i przemieszczeń przedniej ściany jamy brzusznej opracowane w ramach prac [9-10]. Wielokątny membranowy model implantu poddano wymuszeniom odpowiadającym przemieszczeniom i odkształceniom brzucha odpowiadającym miejscu przepukliny. Wybrano pięć stref odpowiadających najczęściej występującej przepuklinie (Rys. 8) o znacznym zróżnicowaniu ekstremalnych odkształceń i ich kierunków. Większość stosowanych implantów wykazuje cechy materiału ortotropowego. Oznacza to, że ich zachowanie może zależeć od orientacji ułożenia podczas wszczepiania. W tym celu zbadano wpływ orientacji ortotropowego implantu na siły w połączeniach siatki z tkanką oraz wyznaczono położenia optymalne ze względu na minimum siły w połączeniu [11-12]. Zdefiniowano model MES i wykonano analizę statyczną membrany po wpływem wymuszeń odpowiednich do strefy położenia. Siatkę przepuklinową obracano tak, aby wyznaczyć jej najlepszą pozycję czyli taką, przy której maksymalne siły w połączeniach będą najmniejsze. Wartości maksymalnych sił w poszczególnych strefach odpowiadające orientacji implantu od 0 do 90° przedstawiono na Rys. 9.



Rys. 9 Maksymalne siły w pięciu strefach brzucha (c1-c5) przy odpowiedniej orientacji implantu (minimum dla orientacji 0°)

Na tej podstawie ustalono optymalną orientację badanej siatki odpowiadającą poszczególnym strefom implantacji (Rys. 10). Podobnie jak poprzednio zastosowano analizę wrażliwości poszukiwanych sił na zmianę sztywności implantu związaną ze zmianą orientacji siatki. Pomimo wagi opisanego wyżej zagadnienia w problemie efektywności operacji przepukliny, nie było ono wcześniej szczegółowo analizowane, a sygnalizowane w literaturze informacje ograniczały się jedynie do dwu orientacji ułożenia siatki bez względu na strefę brzucha. Należy podkreślić, że wielokierunkowa analiza orientacji implantu stanowiła zupełnie nowe podejście do symulacji zachowania wszczepionej siatki i pozwoliła na sformułowanie interesujących wniosków, które mogą zmniejszyć możliwości nawrotów choroby i chronicznego bólu pooperacyjnego u pacjenta.



Rys. 10 Zalecane orientacje sztywniejszego kierunku materiału implantu w poszczególnych strefach implantacji

IK

Kolejnym problemem badawczym było modelowanie materiału siatek. Zwłaszcza syntetyki, wykazujące cechy materiałów nieliniowych wymagają szczególnej uwagi. Można tu wymienić materiały cechujące się biliniową sztywnością, jak niektóre analizowane implanty przepuklinowe (DualMesh Gore®, Parietex®) czy materiały hipersprężyste, jak poliuretan czy kleje. We wszystkich tych przypadkach konieczne było wykonanie badań eksperymentalnych, analiza danych pomiarowych a następnie identyfikacja modeli materiałowych. Problem modelowania materiału o charakterze nieliniowym podjęto w pracy [6], gdzie uwagę skupiono na materiałach hipersprężystych, które będą w przyszłości wykorzystane w modelowaniu siatek chirurgicznych. Będzie to możliwe z uwagi na zidentyfikowany eksperymentalnie charakter zachowania implantu DualMesh Gore®. W dotychczasowych modelach siatek chirurgicznych stosowano biliniowe funkcje materiałowe. Tutaj dodatkowo zastosowano model sieci gęstej w modelowaniu siatek plecionych [11-12]. Model ten jest stosowany w analizie tkanin technicznych, niemniej jednak nie był jeszcze stosowany w modelowaniu implantów przepuklinowych. W pracy [6] również analizuje się dane eksperymentalne i odpowiednie modele matematyczne materiałów syntetycznych oparte na MES.

Problem efektywności naprawy przepukliny brzusznej oraz unikania nawrotów choroby jest znany z literatury ale nie są znane metody oceny połączenia siatki z tkanką. Modelowanie implantów chirurgicznych oraz badania ich zachowania stanowią nowatorski problem, mało jeszcze dyskutowany w literaturze światowej, jak podano w przeglądzie literatury opublikowanych prac. Dyskutuje się modelowanie implantu, potrzebę jego poprawnego zaprojektowania, niemniej jednak, w żadnej ze znanych wcześniej prac nie podano metodologii oceny wytrzymałości zastosowanego sposobu połączenia. Ponadto badania zachowania wszczepionego implantu wykorzystujące wyniki analizy stanu odkształceń brzucha człowieka pozwoliły na sformułowanie zaleceń klinicznych dla chirurgów wykonujących operacje przepuklin. Metodologia oceny trwałości takiego połączenia jest najbardziej istotnym, oryginalnym elementem moich badań i nie została wcześniej opisana w literaturze naukowej. Zastosowanie nieliniowych hipersprężystych modeli materiałowych oraz modeli reologicznych do analizy materiałów syntetycznych będzie stanowić cel dalszych badań.

We wszystkich rozpatrywanych problemach, wyniki symulacji komputerowych zaproponowanych modeli zweryfikowano badaniami doświadczalnymi ich modeli fizycznych, co pozwoliło to na ocenę poprawności modelowania matematycznego. W badaniach wykorzystano opracowane autorskie kody komputerowe do analizy

mechanicznej (Matlab) oraz komercyjne systemy analizy MES, jak MSC.Marc i Abaqus wraz z procedurami własnymi (Fortran).

Wyniki uzyskane przeze mnie w opisanych powyżej badaniach dotyczących modelowania struktur biomechanicznych i opublikowane w omówionych pracach stanowiły podstawę do opracowania systemu "HAL2010" wspomagającego chirurgów w optymalnym planowaniu operacji przepukliny brzusznej, powstałego w ramach projektu HAL2010, w którym pełniłam rolę kierownika grupy zadań.

2.2.3 Wybrany cykl prac:

- [1] **Lubowiecka I.**, Armesto J., Arias P., Lorenzo H.: Historic bridge modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics, ENGINEERING STRUCTURES, Vol. 31, iss. 11, 2009: 2667-2676;
- [2] Armesto J., **Lubowiecka I.**, Ordonez C., Rial F.: FEM modeling of structures based on close range digital photogrammetry, AUTOMATION IN CONSTRUCTION, Vol. 18, iss. 5, 2009: 559-569;
- [3] Szymczak C., **Lubowiecka I.**, Tomaszewska A., Śmietański M.: Modeling Of The Fascia-Mesh System And Sensitivity Analysis Of A Junction Force After A Laparoscopic Ventral Hernia Repair, JOURNAL OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS, Vol. 48, iss. 4, 2010: 933-950;
- [4] **Lubowiecka I.**, Szymczak C., Tomaszewska A., Śmietański M.: A FEM membrane model of human fascia - Synthetic implant system in a case of a stiff ventral hernia orifice. SHELL STRUCTURES: THEORY AND APPLICATIONS, (eds.: W. Pietraszkiewicz, I. Kreja), Vol. 2, 2010: 311-314;
- [5] **Lubowiecka I.**, Arias P., Riveiro B., Solla M.: Multidisciplinary approach to the assessment of historic structures based on the case of a masonry bridge in Galicia (Spain), COMPUTERS & STRUCTURES, Vol. 89, iss. 17-18, 2011:1615-1627;
- [6] **Lubowiecka I.**, Rodríguez M., Rodríguez E., Martínez D.: Material modelling and simulation of joints with flexible adhesive. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADHESION AND ADHESIVES, Vol. 37, 2012: 56-64;
- [7] **Lubowiecka I.** Orthotropic membrane as a mechanical model of surgical implant in the abdominal hernia repair. TASK QUATERLY, 16 vol. 1, 2012: 23-31;
- [8] **Lubowiecka I.** Dynamics of mechanical model of implant-tissue system in ventral hernia repair. VIBRATIONS IN PHYSICAL SYSTEMS, Vol. 25, 2012: 261-266;

- [9] Szymczak C., **Lubowiecka I.**, Tomaszewska A., Śmiateński M.: Investigation of abdomen surface deformation due to life excitation: Implications for implant selection and orientation in laparoscopic ventral hernia repair, CLINICAL BIOMECHANICS, Vol. 27, iss: 2, 2012: 105-110;
- [10] Śmiateński M. Bury K. Tomaszewska A. **Lubowiecka I.**, Szymczak C.: Biomechanics of the front abdominal wall as a potential factor leading to recurrence in laparoscopic ventral hernia repair, SURGICAL ENDOSCOPY, Vol. 26. iss. 5, 2012: 1461-1467;
- [11] **Lubowiecka I.**, Behaviour of orthotropic surgical implant in hernia repair due to the material orientation and abdomen surface deformation, COMPUTER METHODS IN BIOMECHANICS AND BIOMEDICAL ENGINEERING, 2013, doi.org/10.1080/10255842.2013.789102;
- [12] **Lubowiecka I.**, Mathematical modelling of implant in an operated hernia for estimation of the repair persistence, COMPUTER METHODS IN BIOMECHANICS AND BIOMEDICAL ENGINEERING, 2013, DOI:10.1080/10255842.2013.807506.

2.3 Osiągnięcia dydaktyczne

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora moja praca dydaktyczna nadal obejmowała przedmioty z zakresu mechaniki oraz informatyki na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej (na kierunkach Budownictwo oraz Transport).

Moje główne osiągnięcia dotyczyły przygotowania materiałów dydaktycznych – skrypt do nauki programowania R. Jankowski, I. Lubowiecka, W. Witkowski.: "Podstawy programowania w języku MATLAB", Politechnika Gdańska (2003); koordynowania przedmiotu Technologie Informacyjne (na kierunku Budownictwo); Informatyka (na kierunku Transport). Byłam recenzentem w dwu przewodach doktorskich za granicą (Hiszpania). Mój wysiłek dotyczący dydaktyki został nagrodzony Nagrodą Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej za osiągnięcia naukowe i dydaktyczne w roku 2004.

2.4 Osiągnięcia popularyzatorskie i organizacyjne

W ramach zadań o charakterze organizacyjnym i popularyzujących naukę zajmowałam się organizacją następujących konferencji i seminariów naukowych:

- międzynarodowe warsztaty "Simulations in Urban Engineering" organizowane w ramach Centrum Doskonałości (V Program Ramowy UE, Politechnika Gdańska 2004);
- The 8th Conference SSTA2005 „Shell Structures. Theory and Application” Gdańsk-Jurata 2005, sekretarz konferencji);

- 3 seminaria dla doktorantów i pracowników Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Gdańskiej prowadzonych przez wiodących naukowców europejskich w r. 2003.

Po wieloletniej pracy w Zarządzie Oddziału Gdańskiego PTMTS zostałam odznaczona srebrną odznaką Zasłużony dla Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej w 2008 r. Byłam też członkiem Rady Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska w latach 2004-2008 oraz członkiem kolegium elektorów Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska w latach 2001-2008.

Przygotowywałam także katalog prac badawczych opublikowanych przez pracowników Katedry Mechaniki Budowli i Mostów za lata 2007 oraz 2009 w formie książkowej, dostępny w KMBiM. Opracowałam też recenzje prac naukowych w 5 międzynarodowych czasopismach naukowych.

IZABELA LIBOWICZ