MODELOWANIE INŻYNIERSKIE ISSN 1896-771X
38, s. 295-300, Gliwice 2009

ANALIZA BIOMECHANICZNA ODCINKA SZYJNEGO KRĘGOSŁUPA CZŁOWIEKA W SYTUACJI ZASTOSOWANIA STABILIZACJI

WOJCIECH WOLAŃSKI, DAGMARA TEJSZERSKA

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska
e-mail: wojciech.wolanski@polsl.pl, dagmara.tejszerska@polsl.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono model odcinka szyjnego kręgosłupa człowieka sformułowany metodą elementów skończonych. Opracowany model MES posłużył do biomechanicznej analizy kręgosłupa szyjnego po przedniej stabilizacji. Prezentowane wyniki przedstawiają zachowanie się trójwymiarowego modelu odcinka szyjnego kręgosłupa pod wpływem różnych fizjologicznych obciążeń. Badania te posłużyły do pogłębienia wiedzy o biomechanice odcinka szyjnego kręgosłupa człowieka w sytuacji zastosowania stabilizacji. Przedstawione modele mogą być również użyte do analizy klinicznych problemów dotyczących kręgosłupa szyjnego człowieka.

1. WSTĘP

Etiologia urazów i schorzeń kręgosłupa wskazuje na konieczność prowadzenia badań interdyscyplinarnych z zastosowaniem różnych technik. Badania modelowe segmentów szkieletowych człowieka są jedną z rozwijających się dynamicznie dziedzin biomechaniki. Umożliwiają one lepsze poznanie parametrów kinematycznych i dynamicznych, a także określenie warunków powstania urazów i objawów patologii . Pomimo wielu prowadzonych badań problemy kręgosłupa wciąż istnieją i należy się spodziewać, że przy dalszym rozwoju cywilizacyjnym oraz starzejącym się społeczeństwie będą narastać [4, 7, 8, 11, 13].

Badania odcinka szyjnego kręgosłupa człowieka są częstym tematem rozważań naukowych. Również w Polsce w ostatnich latach znacznie wzrosło zainteresowanie tą problematyką [1, 2, 8, 9]. Także badania naukowe prowadzone w Katedrze Mechaniki Stosowanej wpisują się w ten obszar biomechaniki [6, 10, 12]. Jednak wiele zagadnień związanych z chirurgią kręgosłupa szyjnego jest wciąż nierozwiązanych. Do dokładnego poznania zagadnień związanych z leczeniem kręgosłupa szyjnego w znacznym stopniu mogłyby przyczynić się rozważania przedstawiające całościowo złożony problem stabilizacji kręgosłupa z dobrze przeanalizowaną biomechaniką zaplanowanej metody klinicznego leczenia. Dotyczy to w szczególności metod leczenia wad kręgosłupa związanych ze zmianami pourazowymi oraz zwyrodnieniami dysków międzykręgowych oraz ich wpływu na warunki obciążeń wewnętrznych.

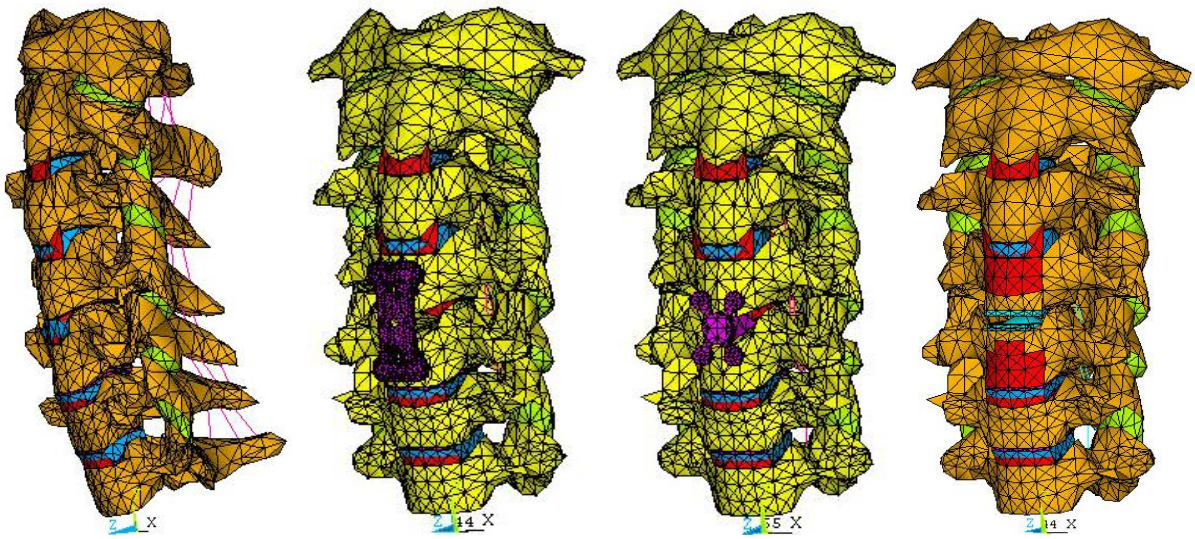
W ramach niniejszej pracy podjęto próbę uzupełnienia wiedzy dotyczących zjawisk zachodzących w wewnętrznych strukturach kręgosłupa w sytuacji zastosowania stabilizacji. Przeprowadzone badania modelowe różnych metod operacyjnego leczenia umożliwiają ich

porównanie pod względem właściwości biomechanicznych. Uzyskane wyniki mogą być pomocne lekarzom zajmujących się leczeniem schorzeń i uszkodzeń kręgosłupa szyjnego w wyborze odpowiedniej techniki oraz przewidywaniu wyniku leczenia.

2. METODYKA BADAŃ

Istotą prezentowanych badań jest analiza numeryczna zjawisk fizycznych występujących w szyi człowieka w przypadku zastosowania stabilizacji. Dzięki wykorzystaniu modeli MES sformułowanych w środowisku Ansys, można analizować wewnętrzne obciążenia działające w kręgosłupie po wprowadzeniu stabilizacji do jego struktur. Zaproponowana metodologia pozwala także określić oddziaływania stabilizatora na kręgosłup szyjny. Potrzebne dane wejściowe do symulacji numerycznych w postaci parametrów materiałowych kręgosłupa człowieka zostały zebrane podczas realizacji w Katedrze Mechaniki Stosowanej projektu pt. „Identyfikacja cech biomechanicznych odcinka szyjnego kręgosłupa człowieka z wykorzystaniem metod optymalizacji".

Za pomocą opracowanych modeli (rys.1.) można zweryfikować stosowane w praktyce klinicznej systemy stabilizacji pod względem mechaniki stabilizowanego odcinka. Dodatkowo będzie można dokonać oceny cech stabilizacji obecnie dostępnych na rynku, a tym samym doboru skuteczniejszego leczenia oraz zmniejszenia powikłań podczas implantacji. Można powiedzieć, że wówczas ziszczą się słowa pioniera neurochirurgii Waltera Dandy, że „najlepszą operacją jest ta, która jest najlepsza dla twojego pacjenta". Słowa te nabierają szczególnego znaczenia w dzisiejszych czasach, kiedy dokonuje się na naszych oczach postęp techniczny i technologiczny, zwłaszcza w chirurgii kręgosłupa.



Rys.2. Modele kręgosłupa szyjnego:
a) fizjologiczny, b) z płytką Zenith, b) ze stabilizacją D·Fun·M, c) z implantem Prodisc C

Konieczna dla badań modelowych identyfikacja parametrów materiałowych tkanek została przeprowadzona w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych, które były wykonane w tym projekcie oraz studia literaturowe anatomii i fizjologii kręgosłupa szyjnego [3, 4, 5, 9, 11, 13]. Zebrane charakterystyki obejmą więzadła, stawy i krążki międzykręgowe, których rola jest bardzo istotna dla mechaniki odcinka szyjnego (tabela 1).

Tabela 1. Własności materiałowe struktur kręgosłupowych

Element	Moduł Younga [MPa]	Liczba Poissona
Kręgi	10000	0,30
Jądro miażdżyste	2	0,49
Pierścień włóknisty	15	0,30
Płytka graniczna	100	0,40
Połączenia stawowe	3	0,40
Więzadło podłużne przednie	11	0,40
Więzadło podłużne tylnie	9	0,40
Więzadło żółte	5	0,40
Więzadło międzykolcowe	8	0,40
Więzadło poprzeczne	4	0,40

Ze względu na wcześniejszą prezentację modelu fizjologicznego kręgosłupa człowieka i jego walidacji [10], w niniejszej pracy ograniczono się do przedstawienia własności materiałowych struktur kręgosłupowych, przy których uzyskano zadowalającą zgodność wyników modelowych z doświadczalnymi. Na tej podstawie przyjęto, że fizjologiczny model szyjnego kręgosłupa może posłużyć jako narzędzie umożliwiające przeanalizowanie różnych technik operacyjnych. W tym celu zmodyfikowano fizjologiczny model wprowadzając w miejsce usuniętego krążka międzykręgowego wybrane stabilizatory: Zenith, D·Fun·M, oraz Prodisc C. We wszystkich przypadkach implantację przeprowadzono na poziomie segmentu ruchowego C4-C5 i przyjęto te same własności materiałowe metalowych części implantów odpowiadające własnościom stopu tytanu Ti-6Al-4V ($E = 1{,}1*10^5$ MPa, ν=0,3). Dzięki temu uzyskano trzy modele kręgosłupa szyjnego po implantacji (rys.1.).

Analizę biomechaniczną odcinka szyjnego kręgosłupa człowieka w sytuacji zastosowania różnych typów stabilizacji przeprowadzono dla tych samych w warunków obciążenia, przy których model fizjologiczny został zweryfikowany. Sekwencja badań modelowych obejmowała następujące warianty symulacji numerycznych:

- ściskanie osiowe kręgosłupa szyjnego (siłą 200N),
- zginanie w przód (momentem 3 Nm),
- zginanie w tył (momentem 3 Nm).

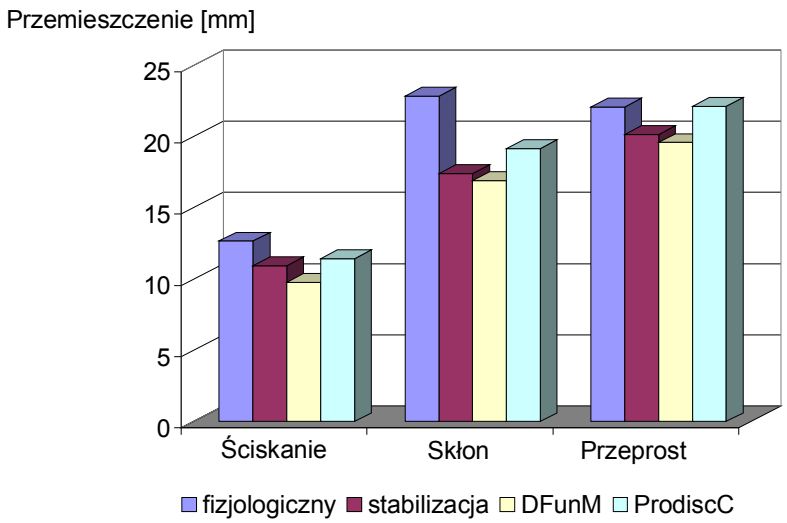
Przyjęte wartości obciążeń odpowiadają naturalnej pracy kręgosłupa szyjnego. Tym samym uzyskane wyniki umożliwiają w fizjologicznych warunkach ocenę analizowanych stabilizatorów do operacyjnego leczenia odcinka szyjnego kręgosłupa człowieka

3. WYNIKI

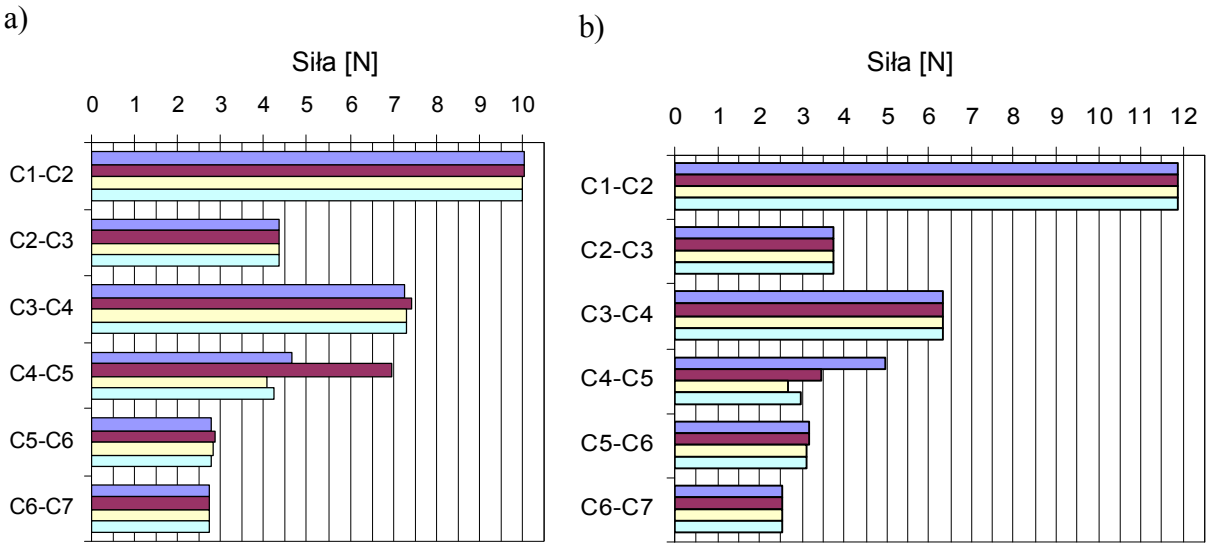
Analiza statyczna modeli kręgosłupa człowieka w przypadku zastosowania stabilizatorów pozwala na wyznaczenie przemieszczeń, naprężeń, odkształceń i sił wewnętrznych struktur kręgosłupowych. Jednak rozważania dotyczące wpływu stabilizacji na własności kręgosłupa ograniczono do porównania przemieszczeń i sił działających na wyrostki stawowe. Z mechanicznego punktu widzenia, wybór tych parametrów wydaje się być słuszny, ponieważ na podstawie przemieszczeń możemy szacować sztywność układu, a na bazie sił wewnętrznych jego wytrzymałość. Natomiast w przypadku analizy naprężeń i odkształceń możemy popełnić błędy wynikające z nieciągłości w układzie kręgosłup - implant w odniesieniu do fizjologicznego. Zmiany w odcinku szyjnym spowodowane wprowadzeniem stabilizatorów

mogą powodować lokalne koncentracje naprężeń i odkształceń. Ze względu na różną konstrukcję implantów ich wartości i miejsca występowania mogą się różnić, co dodatkowo może utrudniać wyciągnięcie właściwych wniosków.

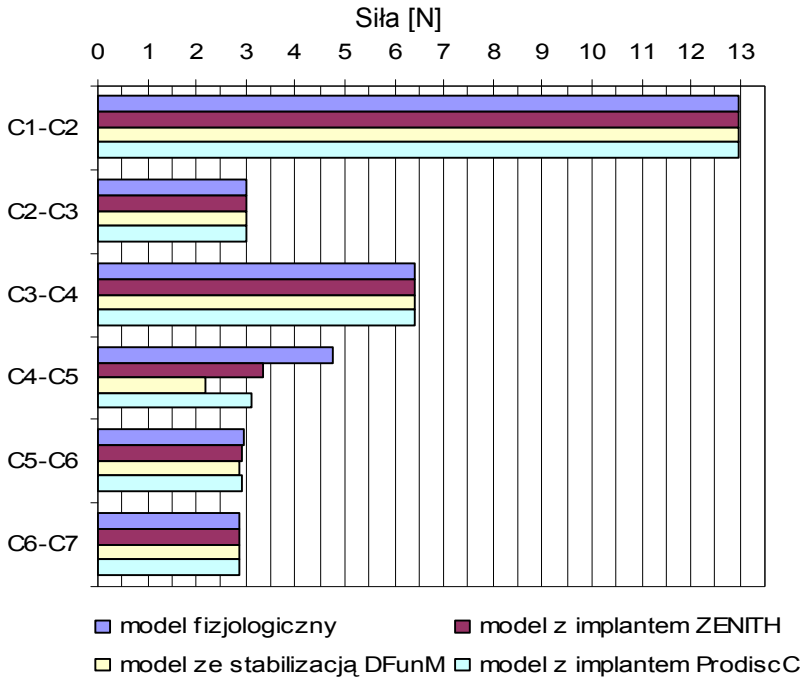
Poniżej na rysunku 2 przestawiono wypadkowe przemieszczenie kręgosłupa szyjnego przed i po stabilizacji uzyskane dla różnych obciążeń. Można zauważyć, że zginanie kręgosłupa powoduje większe przemieszczenia niż ściskanie, a najsztywniejszy układ stanowi kręgosłup z implantem D·Fun·M. Natomiast na rysunku 3 i 4 pokazano porównanie wewnętrznych sił występujące na wyrostkach stawowych kręgów, które uwidacznia wpływ stabilizatora na sąsiednie segmenty ruchowe.



Rys.2. Maksymalne przemieszczenia modeli kręgosłupa szyjnego dla różnych obciążeń



Rys.3. Maksymalne siły występujące na wyrostkach stawowych kręgów podczas:
a) ściskania, b) zginania w przód



Rys.4. Maksymalne siły występujące na wyrostkach stawowych kręgów podczas zginania w tył

4. WNIOSKI

Praca jest próbą uzupełnienia obecnego stanu wiedzy dotyczącej zjawisk biomechanicznych zachodzących w kręgosłupa człowieka szczególnie w sytuacjach zastosowania stabilizacji. Opracowane autorskie modele umożliwiły nieinwazyjne rozważania dotyczące implantacji odcinka szyjnego i przeprowadzenie symulacji numerycznej dla różnych warunków biomechanicznych. Uzyskane wyniki badań modelowych umożliwiły poznanie niektórych efektów zastosowania różnych stabilizatorów i pozwoliły zauważyć, że:

- płytka wraz z czopem zastępującym zniszczony krążek międzykręgowy (D-Fun-M) powoduje znaczne usztywnienie układu,
- brak wszczepu między kręgami powoduje wzrost sił w stawach segmentów sąsiadujących, jak to ma miejsce w przypadku stabilizacji płytkowej Zenith.
- kręgosłup z ruchomym implantem (Prodisc C) posiada zbliżoną charakterystykę sztywnościową i obciążeniową do stabilizowanego układ.

Spostrzeżenia dotyczące analizowanych technik operacyjnych mogą wspomóc lekarzy w planowaniu stabilizacji i wyborze metody dopasowanej do choroby pacjenta. Na tym etapie badań proponuje się sztuczne dyski, które zastępują pracę krążków międzykręgowych w przypadku implantacji kręgosłupa szyjnego przy zachowanym aparacie więzadłowym. Jednak w dalszych badaniach przewiduje się analizę obciążeń dynamicznych w operowanym kręgosłupie, aby uzyskać optymalne dopasowanie konstrukcji stabilizacji, a tym samym lepiej odtworzyć właściwości biomechaniczne segmentu ruchowego.

Badania zostały sfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu nr N N502 365035.

LITERATURA

1. Będziński R., Kędzior K., Kiwerski J., Morecki A., Skalski K., Wall A., Wit A.: Biomechanika i Inżynieria Rehabilitacyjna, Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, tom 5, pod red. Nałęcza M., Akademicka Oficyna Wydawnicza, PAN Warszawa 2004.
2. Będziński R.: Biomechanika inżynierska, Zagadnienia wybrane, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997.
3. Bochenek A., Reicher M., „Anatomia człowieka", Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 1990.
4. Bogduk N., Mercer S.: Biomechanics of the cervical spine. 1: Normal kinematics, Clinical Biomechanics 15, pp. 633-648, 2000.
5. Guilak F., Ting-Beall H. P., Bear A. E., Trickley W. R., Erickson G. R., Setton L. A.: Viscoelastic properties of intervertebral disc cell – identification of two biomechanical distinct cell population, Spine, vol.24, no.23, pp. 2475-2483, 1999.
6. Gzik M., Świtoński E., Tejszerska D., Wolański W., Potkowa P., Alshammari N. K.: Analiza ruchu kierowcy w płaszczyźnie czołowej oraz oddziaływań wewnętrznych w kręgosłupie szyjnym podczas wypadków samochodowych, Modelowanie Inżynierskie, Nr 32, s. 179-186, Gliwice 2006.
7. Kiwerski J., Kowalski M., Krasuski M., Szymanik W.: Schorzenia i urazy kręgosłupa, Wydawnictwo PZWL, Warszawa 2001
8. Pezowicz C.: Numerical analysis of stiffness of cervical segment spine with fixator, Acta of Bioengineering and Biomechanics, vol. 4, no.1, pp. 107-108, 2002.
9. Radek A. Maciejczak A.: Stabilizacja kręgosłupa, Część pierwsza: kręgosłup szyjny. AGH Uczelniane wydawnictwa naukowo-dydaktyczne, Kraków 2006.
10. Tejszerska D. Wolański W.: Badania modelowe zespolenia kręgosłupa szyjnego, Nauka Innowacje Technika, Tom 2, str. 12-16, Warszawa 2005.
11. Triano J.J.: Biomechanics of spinal manipulative therapy, The Spinal Journal vol. 1, pp.121-130, 2001.
12. .Wolański W., Tejszerska D.: The influence of a stabilization plate on cervical spine, Acta of Bioengineering and Biomechanics, Vol. 6, Suplement 1, pp. 234-238, Gdańsk 2004.
13. .Yoganandan N., Kumaresan S., Pintar F.A.: Biomechanics of the cervical spine Part 2. Cervical spine soft tissue response and biomechanical modeling, Clinical Biomechanics 16, pp.1-27, 2001.

BIOMECHANICAL ANALYSIS OF THE CERVICAL SPINE IN SITUATION WHEN STABILISATION WAS APPLIED

Summary. Described in the paper is the model of cervical spine formulated using finite element method. This FE model was developed to biomechanical analysis of the cervical spine stabilisation. The present results demonstrates behaviour of three-dimensional model of cervical spine under various physiological loads. The investigations was used to understanding the biomechanics of the cervical spine when stabilisation was applied. Presented models can also be used to analyse the clinical problems concerning biomechanics of human cervical spine.