

Development of innovative training solutions in the field of functional evaluation aimed at updating of the curricula of health sciences schools



MODUŁ BIOMECHANIKA KRĘGOSŁUPA

Jednostka dydaktyczna A: Biomechanika normalnego kręgosłupa



Spis treści

1. OBJECTIVES AND INTRODUCTION	2
General concepts	2
2. NORMAL BIOMECHANICS OF CERVICAL SPINE	3
2.1 Biomechanics of upper cervical spine.....	3
Atlanto-occipital joint.....	3
Atlanto-axial joint	4
2.2 Biomechanics of lower cervical spine	¡Error! Marcador no definido.
3. NORMAL BIOMECHANICS OF THORACIC SPINE	7
Thoracic spinal motion segment.....	9
4. NORMAL BIOMECHANICS OF LUMBAR, SACRAL AND COCCYGEAL SPINE	11
Lumbar spinal motion segment	12
5. WHAT LOAD DOES THE SPINE UNDERGO WHEN WE ARE ON DIFFERENT REST POSITIONS?	14
6. HOW IS THE BIOMECHANICS OF THE SPINE WHEN WE MAKE FUNCTIONAL MOTOR GESTURES?	15
7. KEY IDEAS	16
8. REFERENCES	18

1. Wprowadzenie i cele

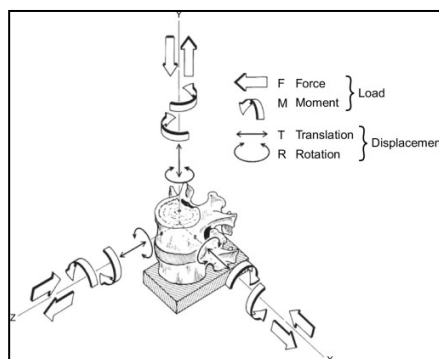
W niniejszej jednostce dydaktycznej zostaną omówione najistotniejsze aspekty biomechaniki normalnego kręgosłupa. Celami tej jednostki dydaktycznej są:

1. Przypomnienie zagadnień biomechaniki różnych odcinków kręgosłupa w normalnych warunkach.
2. Omówienie biomechaniki kręgosłupa w warunkach prawidłowych w głównych pozycjach spoczynkowych człowieka.
3. Dokonanie przeglądu biomechaniki kręgosłupa w warunkach normalnych podczas wykonywania zwykłych codziennych gestów funkcjonalnych.

Pojęcia ogólne

Kręgosłup pełni cztery główne, wzajemnie powiązane funkcje: 1) podporową, 2) ruchową, 3) obudowującą i ochronną oraz 4) kontrolną. Jako struktura podporowa, kręgosłup funkcjonuje jako szkielet do mocowania narządów wewnętrznych, kończyn górnych i dolnych oraz głowy. Mobilność pozwala na wykonywanie wielu zadań fizycznych związanych z codziennym życiem i pracą, ale komplikuje budowę kręgosłupa. Zamiast jednej sztywnej kolumny, kręgosłup jest elastycznym stosem 24 sztywnych kręgów z elastycznymi dyskami pomiędzy nimi.

Segment ruchowy to "Jednostka Funkcjonalna Kręgosłupa" (FSU - Functional Spine Unit), która składa się z dwóch sąsiadujących kręgów i łączącej je tkanki miękkiej, pozbawionej mięśni. Każdy segment FSU ma sześć stopni swobody (Rys. 1), używając standardowego kartezjańskiego układu współrzędnych dla kręgosłupa, można rozważyć 12 potencjalnych ruchów wokół chwilowej osi obrotu: 2 translacyjne i 2 rotacyjne wzdłuż lub wokół każdej osi (x, y, z). Podsumowując, zakres ruchu jest wyrażony przez translację i rotację w trzech płaszczyznach. W kręgosłupie szyjnym zbyt duży zakres ruchu powinien być traktowany jako uszkodzenie strukturalne kręgosłupa, natomiast zbyt mały zakres ruchu może towarzyszyć sztywności i bólowi.



Rysunek 1 - Układ współrzędnych dla kręgosłupa opracowany przez White'a i Panjabi (1990). Na obrazie pokazano translację i rotację możliwego ruchu dla osi x, y i z. Źródło: E.A. Friis et al. 2017.

2. Prawidłowa biomechanika kręgosłupa szyjnego

Odcinek szyjny składa się z 7 kręgów i tworzy jedną z dwóch lordoz kręgosłupa, które znacznie zwiększają odporność na naprężenia wynikające z kompresji osiowej w porównaniu z kolumną prostoliniową (nawet dziesięciokrotnie). Odcinek szyjny, "kręgi szyjne C1-C7", którego długość waha się od 15 do 16 cm u kobiet i od 18 do 19 cm u mężczyzn, co w 1/4 odpowiada grubości krążków międzykręgowych, prezentuje lordodyczną ruchomą przednio wypukłą krzywiznę o kącie około 36°, która zmienia się w zależności od modyfikacji pozostałych krzywizn kręgosłupa i jest bardziej uwypuklona u osób starszych. Kręgi szyjne, zgodnie z ich cechami charakterystycznymi, można podzielić na górny odcinek kręgosłupa szyjnego (C1-C2) i dolny odcinek kręgosłupa szyjnego (C3-C7).

2.1 Biomechanika górnego odcinka kręgosłupa szyjnego

Staw szczytowo-potyliczny

Kręg szczytowy (dźwigacz) jest pierwszym kręgiem szyjnym i stanowi podstawkę (zwaną również gniazdem lub wcięciem) dla podtrzymania kłykci kości potylicznej. Jego podstawowymi ruchami są ruchy zgięcia i wyprostu lub ruchy kiwania. Ruchy te są osiągnięte przez toczenie się i ślizganie kłykci potylicznych po wklęsłej powierzchni panewki. W zgięciu kłykcie toczą się do przodu i przesuwają do tyłu po przedniej ścianie panewki. W wyproście występuje odwrotne połączenie toczenia i ślizgania. Ruchy zgięcia i wyprostu są ograniczone przez następujące elementy:

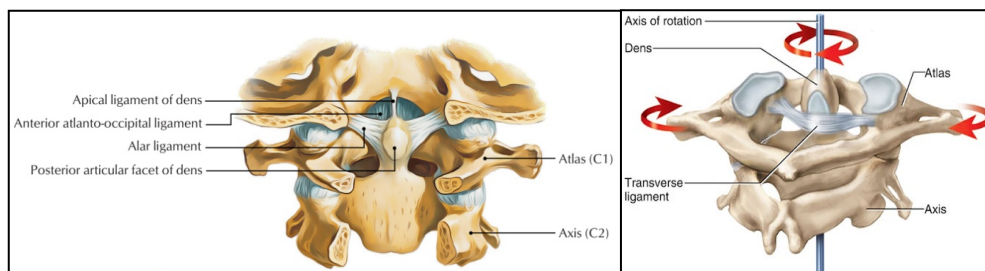
- Staw szczytowo-potyliczny jest uderzany przez obręcz panewki o podstawę czaszki.
- Zgięcie jest ograniczone przez napięcie tylnych mięśni szyi oraz przez uderzenie tkanek podżuchwowych o gardło.
- wyprost jest ograniczony przez ucisk potylicy na mięśnie podpotyliczne.

Obrót i zgięcie boczne między potylicą a kością szczytową jest bardzo ograniczone lub niemożliwe ze względu na głębokość górnej powierzchni stawowej masy bocznej. W tych ruchach głowa i kość szczytowa poruszają się i funkcjonują zasadniczo jako jedna całość. Podczas rotacji głowy kontralateralny kłykiec potyliczny styka się z przednią ścianą swojej panewki stawu szczytowego, a kłykiec ipsilateralny z tylną ścianą swojej odpowiedniej panewki stawu szczytowego. Zamiast tego, w zgięciu bocznym głowy, napięta torebka stawowa stawu szczytowo-potylicznego uniemożliwia uniesienie się kłykcia kontralateralnego z jego jamy. Stabilność stawu szczytowo-potylicznego wynika w dużej mierze z głębokości panewek stawu szczytowo-potylicznego.

Staw szczytowo-obrotowy

Kompleks stawu szczytowo-obrotowego składa się z dwóch bocznych stawów twarzoczaszki, jednego w swoim rodzaju stawu szczytowo-podniebiennego oraz połączenia tylnej powierzchni kości ogonowej z więzadłem poprzecznym.

Ciążar głowy przenoszony jest na kręgosłup szyjny poprzez boczne połączenia szczytowo-osiowe kręgu C2, czyli oś. Wyrostek odontoidalny rozciąga się od trzonu kręgu C2 do wypustki na kości szczytowej znajdującej się w łuku przednim, działa jak "pivot" i tworzy staw szczytowo-osiowy środkowy. Dzięki temu stawowi przedni łuk kręgów kręgosłupa obraca się i przesuwają wokół osi obrotu (Ryc. 2), co umożliwia obracanie się głowy i kręgów kręgosłupa na boki jako jednej całości. Jednostronna rotacja tego stawu wynosi około 40°. W tak ruchomym stawie musi istnieć duża stabilizacja, którą w tym przypadku zapewniają więzadła poprzeczne, wyrostkowe i wierzchołkowe (Ryc. 2), które utrzymują dens podczas rotacji atlasu. Podobnie, pod koniec rotacji, ruch będzie ograniczony przez boczne stawy szczytowo-osiowe, które są znacznie bardziej luźne niż torebki stawowe C0-C1. Rotacja na tym poziomie jest możliwa również ze względu na szczególną anatomię stawów szczytowo-obrotowych bocznych. W niektórych tekstach staw ten opisywany jest jako dwuwklęsły, a w innych jako dwuwypukły, w zależności od tego, czy tekst odnosi się odpowiednio do kształtu powierzchni stawowych, czy do chrząstki stawowej pomiędzy nimi. Z technicznego punktu widzenia jest to staw płaski, umożliwiający ruchy ślizgowe i obrotowe. Oznacza to, że na powierzchniach stawowych C2, dolne i boczne powierzchnie stawowe atlasu mogą podczas rotacji przesuwać się do przodu lub do tyłu. Podczas rotacji C1 ipsilateralna powierzchnia czołowa kręgów szczytowych przesuwa się w dół po tylnym stoku odpowiedniej powierzchni osiowej, podczas gdy powierzchnia przeciwległa przesuwa się w dół po przednim stoku powierzchni osiowej.



Ryc. 2 - Węzadło szczytowe, szczytowo-boczne i poprzeczne wyrostka rylcowatego kręgu obrotowego. Obraz z (lewej) www.earthslab.com i (prawej) www.imagequiz.co.uk.

Staw szczytowo-osiowy boczny wykonuje również ruchy sprzężone podczas zgięcia i wyprostu kręgosłupa szyjnego (Ryc. 3), tzn. gdy kręgosłup szyjny zgina się, kość szczytowa wysuwa się, a gdy kręgosłup szyjny wysuwa się, kość szczytowa zgina się. W pozycji neutralnej C1 jest niepewnie balansowany na wypukłościach swoich chrząstek stawowych, ale gdy zastosuje się osiowe obciążenie kompresyjne, C1 zaczyna się biernie przemieszczać. Przesuwanie się atlasu do tyłu jest ograniczone przez uderzenie jego przedniego łuku o wyrostek zębodołowy, podczas gdy ześlizgiwaniu się do przodu zapobiegają więzadła poprzeczne i poboczne. Za normalne uważa się przesunięcie C1 względem C2 o maksymalnie 3 mm w kierunku przednim, mierzone na podstawie przedniego odstępów szczytowo-zębowego.

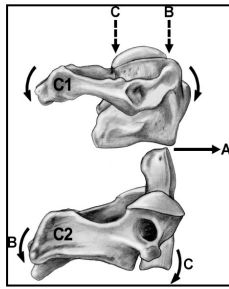


Figure 3 - The biconvex nature of C1 and C2. A, Translation. B, Extension of C1 creating flexion in C2. C, Flexion of C1 creating extension in C2. Image from Swartz E. et al. 2005.

Integralność kompleksu stawowego potyliczno-atlantoosiowego zależy nie tylko od więzadeł, o których była mowa powyżej, ale również od błony tektorialnej, która odgrywa zasadniczą rolę w stabilności tych segmentów. Błona tektorialna jest szerokim przedłużeniem więzadła podłużnego tylnego i przyczepia się pomiędzy tylnym trzonem C2 a kością podstawną. Jej główną rolą jest ograniczenie wyprostowania w stawach potyliczno-obończykowych.

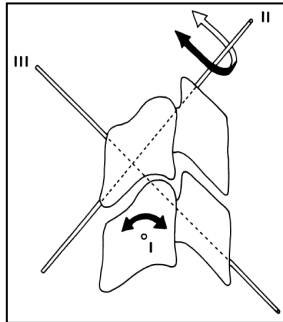
2.2 Biomechanika dolnego odcinka kręgosłupa szyjnego

Aby opisać dolny odcinek kręgosłupa szyjnego, zwykle bierze się pod uwagę odcinek od C3. Staw C2-C3 posiada jednak istotne cechy biomechaniczne, które różnią go od stawów pozostałych kręgów dolnego odcinka szyjnego:

- W przeciwieństwie do typowych stawów zygapofyzyjnych, których płaszczyzny są poprzeczne, wyrostki stawowe górne C3 skierowane są nie tylko ku górze i tyłowi, ale także przyśrodkowo, o około 40°. W przeciwieństwie do typowych stawów zygotycznych, których płaszczyzny są poprzeczne.
- Wyrostki obustronne tworzą razem panewkę, w której zagnieżdżone są wyrostki stawowe dolne osi. Ponadto wyrostki stawowe górne C3 leżą niżej, w stosunku do trzonu kręgu, niż wyrostki niższych segmentów.
- Podczas rotacji osiowej szyi kierunek sprzężenia ze zgięciem bocznym na C2-C3 jest przeciwny do tego, który obserwuje się na niższych segmentach. Zamiast zginać się w kierunku tej samej strony co rotacja, C2 rotuje się średnio od tej strony. Niższe położenie górnego wyrostka stawowego C3 koreluje z niższym położeniem osi rotacji strzałkowej C2.

Charakterystyka dolnych kręgów jest bardziej jednolita. Są one oddzielone krążkiem międzykręgowym w stawie międzykręgowym. Powierzchnie stawowe dolnego i górnego stawu międzywyrostkowego są podobne do stawu siodłowego, co oznacza, że składają się z dwóch wklęsłości zwróconych do siebie i ustawionych względem siebie pod kątem prostym. Powierzchnia dolna górnego trzonu kręgu jest wklęsła ku dołowi w płaszczyźnie strzałkowej, a powierzchnia górna dolnego trzonu kręgu jest wklęsła ku górze w płaszczyźnie poprzecznej. Dzięki tym cechom trzon kręgu może poruszać się do przodu i do tyłu wokół osi poprzecznej (Ryc. 4, Oś I) oraz na boki wokół osi prostopadłej do powierzchni czołowych i podpartej przez wyrostki kolczyste (Ryc. 4, Oś II). Ruch wokół osi

skośnej przednio-tylnej (rysunek 4, oś III) jest niemożliwy ze względu na ustawienie powierzchni czołowych.

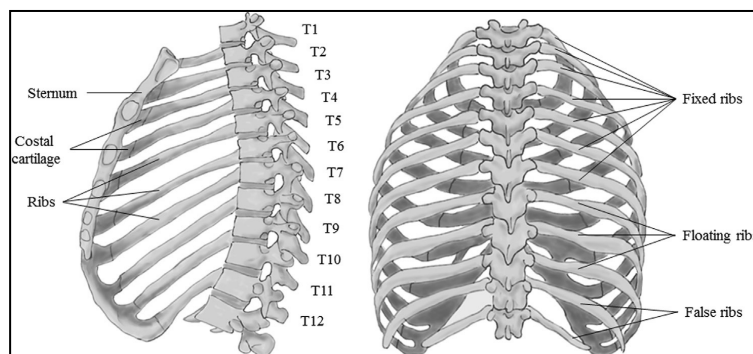


Rycina 4 - Płaszczyzny ruchu segmentu szyjnego. Zgięcie i wyprost odbywają się wokół osi poprzecznej (oś I). Rotacja osiowa odbywa się wokół zmodyfikowanej osi (oś II) przechodzącej prostopadle do płaszczyzny stawów zygzakowo-potylicznych. W trzeciej osi (oś III) ruch nie może wystąpić. Obraz z Bouduk N. et al. 2000.

3. Prawidłowa biomechanika kręgosłupa piersiowego

Łącząc szyjny i lędźwiowy odcinek kręgosłupa, kręgosłup piersiowy musi zapewniać wysoką stabilność dla kontrolowanej przez mięśnie równowagi strzałkowej kręgosłupa poprzez mięśnie erector spinae i mięśnie brzucha, dla optymalnego przenoszenia sił z górnej części ciała na dolne odcinki kręgosłupa oraz dla elastyczności odpowiedniej do wykonywania ruchów trójwymiarowych. Podczas gdy stabilność międzysegmentowa kręgosłupa szyjnego i lędźwiowego jest determinowana głównie przez przylegającą muskulaturę, piersiowe segmenty kręgosłupa są stabilizowane przede wszystkim przez dodatkowe struktury kostne i więzadłowe klatki żebrowej.

Kręgosłup piersiowy składa się z 12 kręgów od T1 do T12, które tworzą wklęsłe wygięcie w kierunku brzuszny w płaszczyźnie strzałkowej zwane kifozą (ryc. 5), której kąt wynosi 45° i waha się od 20° do 70° w kręgosłupie bezobjawowym. Kifoza zależy od kąta lordozy lędźwiowej i ustawienia dolnych kręgów szyjnych, tzn. płaska lordoza lędźwiowa wywołuje obniżenie dolnych krzywizn piersiowych, a oba te czynniki wpływają na ustawienie dolnych kręgów szyjnych w celu utrzymania ich równowagi. Początkowe krzywizny kręgosłupa oraz masa ciała determinują wyższe położenie środka ciężkości. Ze względu na to, że kręgosłup piersiowy jest generalnie wygięty do przodu, istnieją ciągłe tylne siły mięśniowe niezbędne do utrzymania pionowej pozycji kręgosłupa, szczególnie przez mięsień longissimus dorsi. Wraz ze wzrostem obciążenia osiowego, krzywizna odcinka piersiowego prostuje się dla małych kątów początkowych i zwiększa się dla większych kątów. Kifotyczny charakter kręgosłupa powoduje, że obciążenie ściskające rozkłada się przede wszystkim w kierunku przednim w stosunku do trzonu kręgu, podczas gdy tylna część kręgosłupa musi wytrzymać obciążenia rozciągające.



Ryc. 5. Kościsto-chrzęstny odcinek piersiowy kręgosłupa i klatka piersiowa w widoku strzałkowym bez lewych żeber (po lewej) i w widoku od tyłu (po prawej). Obraz za Galbusera F. et al. 2018.

Taka morfologia kręgów wynika z pochylonej konfiguracji kręgosłupa piersiowego. Średni kąt klinowy (Ryc. 6) wynosi około 4 stopni, co wskazuje na tendencję do wyraźniejszego klinowego ustawienia trzonów kręgów w odcinku środkowo-piersiowym. Nachylenie powierzchni stawowych ogranicza zakres ruchu zgięcia/wyprostu i rotacji osiowej oraz zmienia chwilową oś obrotu w płaszczyźnie poprzecznej. W odcinku piersiowym (T1-T10) powierzchnie czołowe mają prawie koronalną orientację. Kąty nachylenia powierzchni czołowych zwiększają się stopniowo w kierunku dolnym w kierunku kręgosłupa lędźwiowego, zbiegając się do płaszczyzny czołowej, zwłaszcza w płaszczyźnie strzałkowej, gdzie wynoszą od $55-60^\circ$ w T1

do 70-75° w T10. (Ryc. 6-A). W płaszczyźnie poprzecznej kąty twarzoczaszki wahają się od 70-80°. Ponieważ wszystkie powierzchnie czołowe w odcinku piersiowym są pierwotnie zorientowane równoległe do płaszczyzny czołowej, zapewniają one wyraźny opór dla translacji w kierunku przednio-tylnym oraz, w mniejszym stopniu, dla obciążeń ściskających w kierunku osiowym. W strefie przejściowej odcinka piersiowo-lędźwiowego (od T11 do L1) zazwyczaj dochodzi do gwałtownej lub odcinkowej zmiany orientacji powierzchni stawowych w płaszczyźnie poprzecznej z czołowej na strzałkową; w strefie przejściowej odcinka szyjno-piersiowego kąt w płaszczyźnie strzałkowej ma tendencję do zmniejszania się, a kąt poprzeczny do zwiększania się w kierunku górnym.

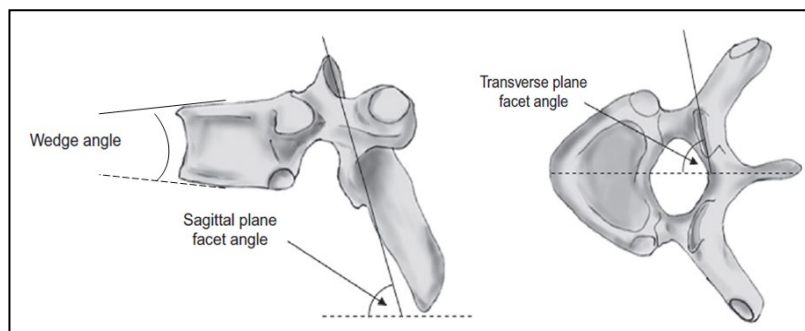


Figure 6 – Wedge angle and Facet joint angles of the thoracic spinal motion segments. Image from Galbusera F. et al. 2018.

Ze względu na kifotyczną krzywiznę kręgosłupa piersiowego i wzrastający moment zginający w pozycji stojącej, przednia część dysku piersiowego jest ściskana przez ciężar ciała, podczas gdy dysk w stanie nieobciążonym ma kształt klina. Ten klinowaty kształt, wynikający z większej przedniej wysokości krążka, jest szczególnie widoczny w dolnej części kręgosłupa piersiowego (T7 - T12) o około 20%, podczas gdy w górnej części kręgosłupa piersiowego krążki są albo dość płaskie (T1 - T4, T5 - T7), albo wykazują większą tylną wysokość krążka (T4 - T5). Średnia wysokość krążka zmniejsza się w kierunku dolnym, osiągając minimum w T4-T5, a następnie zwiększa się, osiągając maksimum w T10-T11. W porównaniu z kręgosłupem szyjnym i lędźwiowym wysokość krążka jest ogólnie mniejsza, ale trzon kręgowy (anulus fibrosus) jest grubszy i mocniejszy, zwłaszcza w części tylnej, co prowadzi do ograniczenia ruchów rotacyjnych, podczas gdy jądro miazdżyste jest stosunkowo małe, co wskazuje, że osiowe obciążenia ściskające są przejmowane przez inne struktury, takie jak stawy międzywyrostkowe lub struktury klatki żebrowej. W płaszczyźnie poprzecznej powierzchnie przekroju poprzecznego krążków międzykręgowych górnego odcinka piersiowego kręgosłupa są relatywnie mniejsze niż dolnego odcinka piersiowego kręgosłupa i wzrastają ku dołowi o ponad 100% od T1-T2 do T11-T12.

Więzadła w tym obszarze zostaną krótko opisane, należy wziąć pod uwagę, że są one wspólne dla innych okolic. Więzadło podłużne przednie, znajdujące się z przodu każdego kręgu, w kręgosłupie piersiowym ma większy przekrój poprzeczny i jest około trzykrotnie silniejsze w górnym niż w dolnym odcinku piersiowym kręgosłupa, ze względu na ograniczenie ruchów nadmiernego wyprostu. Z kolei więzadło podłużne tylne znajduje się w kanale kręgowym i rozciąga się wzdłuż tylnych powierzchni trzonów kręgów; w odcinku środkowo-piersiowym jest silniejsze niż w pozostałych odcinkach. Więzadła te są grubsze w odcinku piersiowym kręgosłupa niż w pozostałych odcinkach, ponieważ muszą zapobiegać ruchom hiperfleksyjnym i hiperekstrakcyjnym. Więzadło **flavum** jest definiowane jako każdy z żółto zabarwionych odcinków elastycznej tkanki znajdującej się pomiędzy blaszkami górnego i dolnego kręgu; jego funkcją jest utrzymanie lub odzyskanie pozycji wyprostowanej. W dolnym odcinku piersiowym, więzadło flavum wykazuje wysoką wytrzymałość na rozciąganie wynoszącą około 300 N, a także posiada dużą powierzchnię przekroju poprzecznego (100 mm²). Więzadła międzykrętarzowe występują w odcinku piersiowym kręgosłupa oraz w górnej części odcinka lędźwiowego i ograniczają pochylenie boczne oraz rotację osiową, natomiast więzadła międzykolcowe i nadkolcowe służą do ograniczenia hiperfleksji. Jednakże więzadło nadkolcowe jest silniejsze od więzadła międzykolcowego z powodu większego ramienia dźwigni podczas ruchu zgięcia.

Ruch odcinka piersiowego kręgosłupa Segment ruchowy kręgosłupa piersiowego

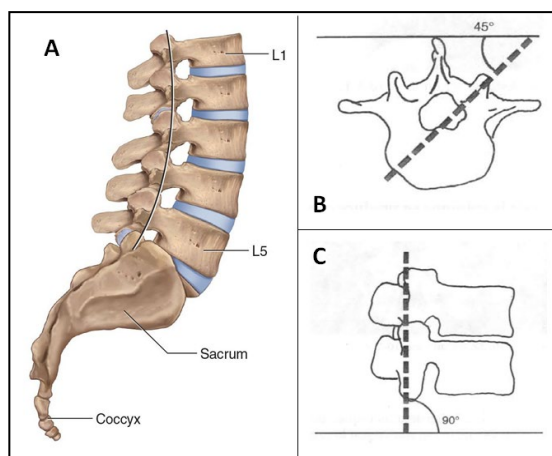
Stwierdzono, że zależność pomiędzy zakresem ruchu a strefą neutralną zmniejsza się w kierunku dolnym dla jednakowych momentów zginających. Strefa neutralna jest to strefa ruchomości, zbliżona do neutralnego położenia stawu, w której struktury kostno-więzadłowe stawiają minimalny opór. In vivo stwierdzono większe zakresy ruchu w dolnych segmentach, ponieważ żebra pływające i fałszywe dolnej części klatki piersiowej mają mniejszy wpływ na ograniczenie ruchu. Ruch segmentarny przebiega w następujący sposób:

- podczas zginania do przodu, kręgi górne zginają się względem kręgu dolnego. Pomiędzy T3 a T10 wyrostek stawowy górny jest lekko pochylony do przodu w płaszczyźnie wieńcowej i podczas zgięcia dochodzi do niewielkiego przesunięcia przedniego kręgu górnego.
- Podczas zginania ku tyłowi, kręgi górne wysuwają się względem kręgu dolnego. Pomiędzy T3 a T10 wyrostek stawowy górny jest lekko pochylony ku przodowi w płaszczyźnie wieńcowej, a podczas wyprostu dochodzi do niewielkiego przesunięcia kręgu nadrzędnego ku tyłowi.
- Podczas zgięcia boczego kręgi górne powinny zginać się bocznie w stosunku do kręgu dolnego, a rotacja może być sprzężona segmentarnie w kierunku ipsilateralnym lub kontralateralnym. Jeśli kręgi górne mogą swobodnie podążać za orientacją stawów zygapofyzyalnych, to wzorzec jest często ipsilateralny.
- Podczas rotacji osiowej, kręgi górne obracają się w tym samym kierunku co rotacja osiowa. Jeśli kręgi górne mogą swobodnie podążać za orientacją stawów zygapofyzyalnych, wówczas wzorzec sprzężenia ze zgięciem bocznym jest ipsilateralny. Występuje również niewielka kontralateralna translokacja w płaszczyźnie poprzecznej kręgu górnego względem dolnego.

Na chwilowe osie rotacji ma wpływ m.in. klatka piersiowa, która podczas ruchów zgięcia/wyprostu przesuwa położenie osi rotacji w płaszczyźnie strzałkowej w kierunku tylnym. Chwilowe osie rotacji segmentu ruchowego kręgosłupa piersiowego przebiegają przez dolne kręgi podczas zgięcia/wyprostu i zgięcia bocznego. Natomiast w rotacji osiowej oś rotacji znajduje się w kanale kręgowym w pobliżu tylnej części trzonu kręgu. Warto wspomnieć, że w odcinku piersiowym, Funkcjonalna Jednostka Kręgosłupa nie uwzględnia przednich części żeber, przednich stawów kostno-chrzęstnych ani mostka. Dlatego też badanie ruchu segmentarnego mogłoby odbywać się poprzez jednostkę pierścieniową, tj. kręgi piersiowe i odpowiednie żebra, a takie podejście mogłoby zmienić rotację osi.

4. Prawidłowa biomechanika kręgosłupa lędźwiowego, krzyżowego i kości ogonowej

Dystalny odcinek kręgosłupa składa się z odcinka lędźwiowego, liczącego 5 kręgów, odcinka krzyżowego, składającego się z 5 połączonych kręgów oraz odcinka kości ogonowej, liczącego 4-5 kręgów. Kręgosłup lędźwiowy ma lordozę wklęsłą tylną, natomiast kość krzyżowa ma lordozę wklęsłą przednią. Trzon kręgu ma budowę strukturalną, która przenosi obciążenia osiowe. Trzony kręgów są główną strukturą nośną kręgosłupa lędźwiowego i często opisywane są jako trzony o kształcie bębna, a ich przekrój poprzeczny przypomina kształtem nerkę. Powierzchnie czaszkowe i ogonowe trzonów kręgów, zwane kostnymi płytami końcowymi kręgów, są lekko wklęsłe i stanowią połączenie dla krążków międzykręgowych. Aby wytrzymać duże obciążenia działające na kręgi lędźwiowe, są one stosunkowo duże, a ich wielkość wzrasta w kierunku kości krzyżowej. Podczas gdy dwa najwyższe trzony kręgów lędźwiowych są umiarkowanie niższe w kierunku przednim niż tylnym (od ok. 4% na L2 do 12% na L1 w linii środkowej strzałkowej), płyty końcowe kręgów L3 są prawie równoległe. Zależność ta jest odwrotna dla kręgów L4 i L5, gdzie wysokość przednia jest większa niż tylna (pomiędzy ok. 7% dla L4 i 14% dla L5 w linii środkowej strzałkowej). Z kolei wszystkie krążki międzykręgowy w odcinku lędźwiowym (od L1/L2 do L5/S1) są przynajmniej dwukrotnie wyższe w kierunku przednim niż tylnym, co oznacza, że lordoza lędźwiowa wynosząca około 60 stopni jest tworzona głównie przez krążki międzykręgowy, a nie kręgi.



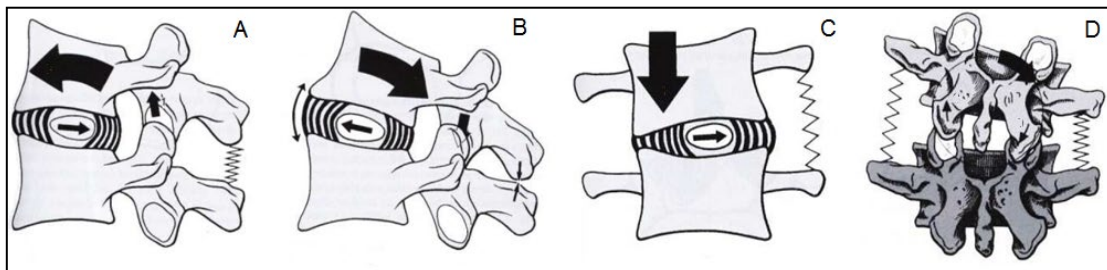
Ryc. 7 - A: Kręgosłup lędźwiowy, kość krzyżowa i kość ogonowa. Obraz za Joseph E. Muscolino 2015. B: orientacja powierzchni lędźwiowych w odniesieniu do płaszczyzny strzałkowej. C: orientacja powierzchni lędźwiowych w odniesieniu do płaszczyzny poprzecznej. Źródło: B and C from Nordin M. 2001.

Stawy lędźwiowe mają orientację strzałkową 90 stopni i 45 stopni w płaszczyźnie poprzecznej. Cechy te odgrywają istotną rolę w biomechanice kręgosłupa lędźwiowego, ponieważ determinują podział obciążeń pomiędzy krążkiem międzykręgowym a stawami czołowymi, jak również odporność na ruchy translacyjne i rotacyjne. W rzeczywistości, stawy czołowe wytrzymują około 16% siły ściskającej w pozycji stojącej. Z drugiej strony, ustawienie stawów licowych w odcinku lędźwiowym umożliwia w większym stopniu zgięcie i wyprost niż rotację, których zakres zwiększa się od góry do dołu.

Ruch odcinka lędźwiowego kręgosłupa

Podczas ruchu zginającego (ryc.8-A) trzon kręgu górnego kręgu FSU przechyla się i przesuwają lekko do przodu, modyfikując grubość krążka międzykręgowego w jego przedniej części i zwiększając go w części tylnej, co powoduje przemieszczenie jądra miazdżystego do tyłu, tak że tylne włókna włóknistego pierścienia zwiększają jego ciśnienie. W tym samym czasie dolna część stawowa kręgu górnego przesuwają się w górę, powodując, że torebka i więzadła są tak napięte jak więzadła tylne: flawum, międzykręgowy, nadgrzebieniowy i tylny więzadło podłużne. To naprężenie ogranicza ruch zginający. W ruchu przeciwnym (ryc. 8-B), tj. W wyprostowaniu, trzon kręgu górnego odchyła się do tyłu, a krążek międzykręgowy staje się cieńszy w jego tylnej części, wypychając jądro krążka międzykręgowego do przodu, napinając przednie włókna włókniste pierścienia. W tym samym czasie następuje rozciągnięcie przedniego więzadła podłużnego i rozciągnięcie więzadeł tylnych. Ponadto podczas wyprostowania dolna część stawowa górnego kręgu mieści się głębiej między górną częścią stawową dolnego kręgu, podczas gdy wyrostki kolczaste stykają się ze sobą. W ten sposób ruch prostowania jest ograniczony przez kostne kontakty łuku tylnego i napięcie więzadła podłużnego przedniego

Należy zauważyć, że to właśnie w ruchach wyprostowania i zgięcia obserwuje się największą translację kręgów, co sprawia, że pomiar translacji lędźwiowej jest czynnikiem determinującym niestabilność kręgosłupa. Aktualna literatura sugeruje, że 2 mm translacji jest normą dla kręgosłupa lędźwiowego, a translacja powyżej 4 mm powinna być oceniana pod kątem niestabilności klinicznej.



Rysunek 8 - Ruch segmentarny kręgosłupa lędźwiowego. A: zgięcie, B: wyprost, C: widok przedni zgięcia bocznego, D: widok tylny zgięcia bocznego. Źródło: Kapandji A.I. 1998.

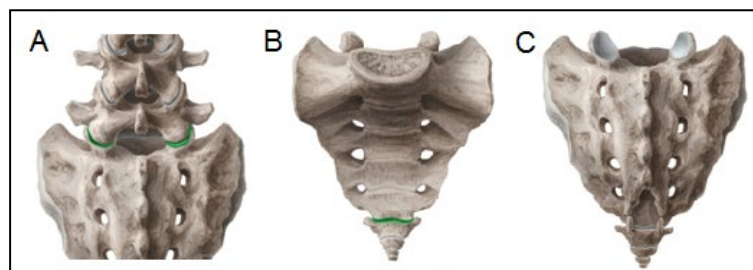
Podczas zginania bocznego trzon kręgu górnego przechyla się na stronę zginania, krążek staje się grubszy po stronie przeciwnej do zginania bocznego, a jądro miazdżyste krążka międzykręgowego przesuwają się nieznacznie na tę stronę; jednocześnie napina się więzadło międzykręgowy poprzeczne (rysunek 8-C). W widoku od tyłu (ryc. 8-D) można opisać nierównomierne przesuwanie się powierzchni stawowych: podczas gdy powierzchnia stawowa po stronie przeciwnej do pochylenia unosi się, powierzchnia stawowa po stronie pochylenia opada. Powoduje to rozciągnięcie więzadła żółtego i torebki stawowej po stronie pochylenia, podczas gdy po stronie przeciwnej te same elementy są napięte.

Unikalne wzorce sprzężenia związane z kręgosłupem lędźwiowym mogą bezpośrednio lub pośrednio przyczyniać się do częstszego występowania klinicznej niestabilności w segmencie L4-L5. Górne segmenty lędźwiowe L1-L2, L2-L3 i L3-L4 charakteryzują się innym wzorcem sprzężenia niż segmenty L4-L5 i L5-S1.1 W górnym odcinku lędźwiowym zgięcie boczne i rotacja zachodzą w przeciwnych kierunkach, natomiast w dolnych segmentach lędźwiowych zgięcie boczne i rotacja zachodzą w tym samym kierunku.

Kość krzyżowa i kość ogonowa

Kość krzyżowa składa się z pięciu trzonów kręgów połączonych ze sobą czterema skostniałymi krążkami międzykręgowymi. Kość krzyżowa łączy się od góry z piątym kręgiem lędźwiowym, od dołu z kością ogonową, a z boku od powierzchni stawowych z dwiema kośćmi biodrowymi, tworząc stawy krzyżowo-biodrowe. Wystająca przednia krawędź pierwszego kręgu krzyżowego jest nazywana wzgórkiem kości krzyżowej (promontory sacrum) a dwie boczne części to sacrum alas. Kość krzyżowa służy jako punkt orientacyjny przy dokonywaniu pomiarów miednicy. Trzony kręgów są połączone dużym krążkiem międzykręgowym, a stawy zgotyeczno-kostne (Ryc. 9-A) mają szerszy odstęp niż powyżej. Staw jest wzmocniony od tyłu przez więzadła międzykostne i grzbietowe więzadła krzyżowo-biodrowe. Więzadło biodrowo-lędźwiowe wywodzi się z wyrostka poprzecznego L5 i przyczepia się do grzebienia biodrowego. Posiada część brzuszna i grzbietową. Więzadło to jest ważne dla ograniczenia ruchu w stawach lędźwiowo-krzyżowych i krzyżowo-biodrowych. Kość krzyżowa jest głęboko pochylona do przodu w stosunku do ostatniego lub piątego kręgu lędźwiowego, a jej kąt w stosunku do płaszczyzny poziomej wynosi średnio prawie 30 stopni.

Kość ogonowa jest małą trójkątną kością w dolnej części kręgosłupa, składającą się z trzech do pięciu (zazwyczaj czterech) zrośniętych kręgów trzonowych. Dolny koniec kości krzyżowej jest połączony w stawie strzałkowym lub często łączy się z kością ogonową (rysunek 9-B). Pierwszy kręgu ogonowy ma krótkie wyrostki poprzeczne, które łączą się z kością krzyżową, oraz dwa rogi lub rogi kości ogonowej, które łączą się z rogami kości krzyżowej (rysunek 9-C). Kręgom ogonowym brakuje szypulek i wyrostków kolczystych, ale pierwsze trzy mają prymitywne ciało i wyrostki poprzeczne. Drugi, trzeci i czwarty kręgu ogonowy zmniejszają się kolejno pod względem wielkości, a ostatni kręgu jest jedynie małym guzkiem kostnym. Staw krzyżowo-biodrowy jest połączony więzadłami krzyżowo-biodrowymi przednimi i tylnymi (powierzchnowymi i głębokimi), więzadłami krzyżowo-biodrowymi bocznymi, więzadłami międzykręgowymi oraz krążkiem międzykręgowym.



Ryc. 9 - Staw lędźwiowo-krzyżowy i krzyżowo-biodrowy. A: Połączenia wyrostków stawowych z połączenia lędźwiowo-krzyżowego. B: Widok przedni stawu krzyżowo-lędźwiowego. C: Widok tylny stawu krzyżowo-lędźwiowego. Źródło: KenHub web site.

5. Jakim obciążeniom poddawany jest kręgosłup, gdy znajdujemy się w różnych pozycjach spoczynkowych?

W niniejszym rozdziale dokonamy przeglądu zmian biomechanicznych opisanych w literaturze, gdy kręgosłup jest utrzymywany w różnych pozycjach spoczynkowych.



Pozycja stojąca

- Podczas stania ciężar ciała przenoszony jest przez kość krzyżową i biodrową na kość udową.
- W pozycji stojącej rozluźnionej ciśnienie waha się od 0,48 do 0,5 MPa. Uciskanie brzucha podnosiło je do 0,92 MPa, a przy zgięciu do przodu wzrastało do 1,1 MPa. During relaxed standing, the pressure vary between 0.48 and 0.5 MPa. Abdominal pressing raised it to 0.92 MPa and increased with forward bending to 1.1 MPa.



Pozycja siedząca

- Podczas siedzenia ciężar ciała przenoszony jest przez kość krzyżową i biodrową na guzki kulszowe.
- Siedząc na krześle z normalnymi, prostymi plecami, wytwarzamy ciśnienie od 0,45 do 0,5 MPa.
- Podparcie lędźwiowe ma największy wpływ na lordozę lędźwiową, a pochylenie oparcia miało największy wpływ na zmniejszenie ciśnienia w obrębie krążka lędźwiowego (0,27 MPa).
- Wraz ze wzrostem pochylenia oparcia lędźwiowego, większy ciężar ciała rozkłada się na oparcie i mniejsza jest aktywacja mięśni erector spinae kręgosłupa.
- Zastosowanie podłokietnika do podparcia tułowia może dodatkowo zmniejszyć obciążenie krążków międzykręgowych podczas siedzenia.



Pozycja leżąca lub pozycja na wznak

- Podczas leżenia na wznak z lekko ugiętymi nogami stwierdzono ciśnienie śródkostne na poziomie L4-L5 wynoszące 0,08 MPa. Przy całkowicie wyprostowanych nogach ciśnienie zmieniło się do 1,11 MPa. Rotacja do pozycji bocznej podniosła ciśnienie tylko nieznacznie do 0,12 MPa.
- Kaszel i kichanie w pozycji leżącej na wznak powodowały ciśnienie aż do 0,38 MPa, ale śmiech podnosił ciśnienie tylko do 0,15 MPa.

6. Jak wygląda biomechanika kręgosłupa, gdy wykonujemy funkcjonalne gesty ruchowe?

W niniejszym rozdziale dokonamy przeglądu zmian biomechanicznych opisywanych w literaturze, gdy kręgosłup jest utrzymywany w różnych funkcjonalnych gestach motorycznych.



Podnoszenie i przenoszenie przedmiotów

- Ciśnienie międzykręgowe wzrasta podczas podnoszenia dużych ciężarów, ale właściwe techniki podnoszenia zmniejszają obciążenie dysku. Wystający brzuch działa jak ciężar przenoszony dalej od ciała.
- Ciśnienie międzykręgowe wzrasta o 50% podczas pochylania się do przodu. Z ciężarkami w rękach, ciśnienie wzrasta jeszcze bardziej o 70% do 220%. Badania wykazały, że ciśnienie międzykręgowe w odcinku lędźwiowym wzrasta do 2,3 MPa podczas podnoszenia ciężaru o wadze 19,8 kg z zaokrąglonymi plecami i prostymi kolanami. Podczas podnoszenia tego samego ciężaru przy zachowaniu prostych pleców i zgięciu w biodrze i kolanie, szczytowe ciśnienie zmniejszyło się do 1,7 MPa.
- W normalnym dysku, włókna pierścieniowe będą napinane przez zwiększone ciśnienie wewnątrzdykowe spowodowane zgięciem tułowia do przodu. Orientacja włókien pierścieniowych w prawidłowym dysku wynosi 60 stopni od pionu, w porównaniu z dyskiem zwyrodnieniowym, w którym włókna pierścieniowe są ułożone bardziej poziomo.
- Kręgosłup lędźwiowy osiąga stabilność i równowagę podczas podnoszenia, ponieważ podczas zginania kręgosłupa do przodu, towarzyszące temu wyprostowanie kości krzyżowej zwiększa napięcie powięzi piersiowo-lędźwiowej.
- Wygięcie kręgosłupa lędźwiowego do przodu wywołuje również skurcz mięśni dna miednicy i mięśnia poprzecznego brzucha, co biomechanicznie napina powięź piersiowo-lędźwiową. To łączne działanie na tylny system więzadłowy działa jak siła zapobiegająca ścinaniu kręgosłupa lędźwiowego.
- Jeśli mięśnie erector spinae są przykurczone w zgiętym kręgosłupie lędźwiowym, skutkiem tego jest zwiększony ucisk na połączenia wyrostków stawowych. Ułatwiłoby to przenoszenie obciążeń przez istotę korową (cortical bone) łuków nerwowych, zmniejszając ucisk na kręgi lędźwiowe, a tym samym przeciwdziałając ciśnieniu międzykręgowemu.



Chód

- Wzrost obciążenia międzykręgowego pomiędzy L3-L4 występuje od 0,2 do 2,5 razy w stosunku do ciśnienia międzykręgowego podczas spoczynku.
- Maksymalne obciążenie jest osiągnięte podczas startu.
- Obciążenie międzykręgowe wzrasta liniowo w zależności od prędkości chodu.

7. Kluczowe zagadnienia

- Kręgosłup pełni cztery główne, powiązane ze sobą funkcje: podporową, ruchową, obudowującą i ochronną oraz kontrolną.
- Segment ruchowy to "Funkcjonalna Jednostka Kręgosłupa" (FSU), która składa się z dwóch sąsiadujących ze sobą kręgów i łączącej je tkanki miękkiej, pozbawionej mięśni. Każdy FSU ma sześć stopni swobody.
- Odcinek szyjny składa się z 7 kręgów i tworzy jedną z dwóch lordoz kręgosłupa, które znacznie zwiększają odporność na naprężenia wynikające z kompresji osiowej w porównaniu z kolumną prostoliniową (nawet dziesięciokrotnie)..
- Staw szczytowo-potyliczny utworzony jest dla kręgu szczytowego i części kłykciowej kości potylicznej, umożliwia ruchy kiwania poprzez toczenie i ślizganie się kłykci potylicznych po wklęsłej powierzchni panewki, znajdującej się w górnej powierzchni bocznej dźwigacza.
- **Kompleks szczytowo-osioły składa się z dwóch bocznych stawów twarzowych, unikalnego stawu szczytowo-zębodołowego oraz stawu pomiędzy tylną powierzchnią odontoidu a więzadłem poprzecznym i pozwala na obracanie się i ślizganie przedniego łuku szczytowego wokół osi obrotu, umożliwiając obrót szczytowy i głowy z boku na bok jako jednej całości.**
- Kręgosłup piersiowy składa się z 12 kręgów od T1 do T12, które tworzą wklęsłą krzywiznę w kierunku brzuszny w płaszczyźnie strzałkowej, zwaną kifozą. Kifotyczny charakter kręgosłupa powoduje, że obciążenia ściskające rozkładają się głównie w kierunku przednim w stosunku do trzonów kręgów, natomiast tylne kręgi muszą wytrzymywać obciążenia rozciągające..
- Dystalny odcinek kręgosłupa składa się z odcinka lędźwiowego, w którym znajduje się 5 kręgów, odcinka krzyżowego, w którym znajduje się 5 połączonych kręgów oraz odcinka kości ogonowej, składającego się z 4-5 kręgów. Kręgosłup lędźwiowy ma lordozę wklęsłą tylną, natomiast kość krzyżowa ma lordozę wklęsłą przednią. Aby wytrzymać duże obciążenia działające na kręgi lędźwiowe, są one stosunkowo duże, a ich wielkość wzrasta w kierunku kości krzyżowej.
- W ruchach wyprostu i zgięcia lędźwi obserwuje się największą translację kręgów, co sprawia, że pomiar translacji lędźwiowej jest czynnikiem determinującym niestabilność kręgosłupa.
- Obciążenie krążków międzykręgowych zmienia się w zależności od pozycji ciała i wykonywanych czynności. W pozycji leżącej ciśnienie międzydyskowe na poziomie lędźwiowym wynosi około 0,08 MPa, natomiast w pozycji stojącej rozluźnionej waha się w granicach 0,48 - 0,5 MPa. W pozycji siedzącej ciśnienie to jest zbliżone do ciśnienia w pozycji dwunożnej, ale pochylenie oparcia ma duży wpływ na obniżenie tego ciśnienia, podobnie jak zastosowanie podłokietnika.
- Podczas chodu obciążenie międzydyskowe odcinka lędźwiowego wzrasta od 0,2 do 2,5 razy w stosunku do ciśnienia śródmięśniowego w spoczynku. Natomiast podczas podnoszenia ciężaru z podłoża, ciśnienie wzrasta jeszcze bardziej o 70% do 220%, zwłaszcza jeśli robi to z wygiętymi plecami i rozstawionymi kolanami. Wpływ na

ciśnienie wewnątrzdyiskowe będzie miało również to, jeśli podnoszony ciężar będzie oddalony od ciała.

8. Referencje

- [1]. Bogduk, N. Mercer, S. Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics. *Clinical Biomechanics*. 2000 (15) 633-648.
- [2]. Brasiliense, LBC. Lazaro, BCR. Reyes, PM. Dogan, S. Theodore, N. Crawford, NR. Biomechanical contribution of the Rib Cage to Thoracic Stability. *Spine*. 2011, 36(26):E1686-E1693.
- [3]. Ebraheim, NA. Patil, V. Liu, J. Haman, SP. Yeasting, RA. Morphometric analyses of the cervical superior facets and implications for face dislocation. *International Orthopaedics (SITCOT)*. 2008, 32:97-101.
- [4]. Friis, EA. Arnorl, PM. Goel, VK. Mechanical testing of cervical, thoracolumbar, and lumbar spine implants. Elsevier. 2017 May; 161-180.
- [5]. Galbusera, F. Wilke, HJ. Biomechanics of the spine. Chapter 4 - Basic Biomechanics of the lumbar spine. Elsevier. 2018, 51-67.
- [6]. Hansen, L. de Zee, M. Rasmussen, J. Andersen, TB. Wong, C. Simonsen, EB. Anatomy and Biomechanics of the Back Muscles in the Lumbar Spine With Reference to Biomechanical Modeling. *Spine*. 2006, 31(17):1888-1899.
- [7]. Herkowitz, HN. Garfin, SR. Eismont, FJ. Bell, GR. Balderston, RA. Rothman-Simeone The Spine: Expert Consult. Elsevier. Chapter 7- Biomechanics of the Spinal Motion Segment. 2015, 109-128.
- [8]. Joseph E. Muscolino. *Manual Therapy for the Low Back and Pelvis. A clinical orthopedic approach*. Ed. Wolters Kluwer. 2015.
- [9]. Kapandji, AI. *Fisiología Articular – Tronco y Raquis 5ª Edición*. Chapter 3 – El raquis lumbar. 1998, 76-128.
- [10]. Kiapour, A. Joukar, A. Elgafy, H. Erbulut, DU. Agarwal, AK. Goel, VK. Biomechanics of the sacroiliac joint: anatomy, function biomechanics sexual dimorphism, and causes of pain. *International Journal of Spine Surgery*. 2020, 14:S3-S13.
- [11]. Lee, DG. Biomechanics of the thorax – reseach evidence and clinical expertise. *Journal of Manual and Manipulative Therapy*. 2015, 23(3):128-138.
- [12]. Liebsch, C. Wilke, HJ. Biomechanics of the spine. Chapter 3 – Basic Biomechanics of the Thoracic Spine and Rib Cage. Elsevier. 2018, 35-50.
- [13]. Lomeli-Rivas, A. Larrinúa-Betancourt, JE. Biomecánica de la columna lumbar: un enfoque clínico. *Acta Ortopédica Mexicana*. 2019, 33(3):185-191.
- [14]. Menchetti, PPM. *Cervical Spine Minimally Invasive and Open Surgery*. Chapter 2 – Functional Anatomy and Biomechanics of the Cervical Spine. Springer. 2016. 11-26.
- [15]. Miralles, RC. Puig, M. *Biomecánica clínica de aparato locomotor*. Part 4 – Biomecánica de los movimientos. Mason, S.A. 2000, 295-315.
- [16]. Oakes, PC. Sardi, JP. Iwanaga, J. Topale, N. Oskouian, RJ. Tubbs, S. Translation of Hecker's 1922 „the Occipital-Atlanto-Axial Ligament System”. *Clinical Anatomy*. 2017, 30:322-329.
- [17]. Pope, MH. Biomechanics of the Lumbar Spine. *Ann Med*. 1989 Oct;21(5):347-51.
- [18]. Romberg, K. Olsén, MF. Kjelby-Wendt, G. Hallerman, KL. Danielsson, A. Thoracic mobility and ist relation to pulmonary function and rib-cage deformity in patients with early onset idiopathic scoliosis: a long-term follow-up. *Spine Deformity*. 2020, 8:257-268.
- [19]. Stammen, JA. Herriott, R. Kang, YS. Bolte, J. Dupraix, R. *Sequential Biomechanics of the Human Upper Thoracic Spine and Pectoral Girdle*. *Annals of Advances in Automotive Medicine*. 2012 Oct, 56:151-162.

- [20]. Swartz, EE. Floyd, RT. Cendoma, M. Cervical Spine Functional Anatomy and the Biomechanics of Injury Due to Compressive Loading. *Journal of Athletic Training*. 2005; 40(3)c155-161.
- [21]. Tague, RG. Fusion of Coccyx to Sacrum in Humans: Prevalence, correlates, and effect on pelvic size, with obstetrical and evolutionary implications. *American Journal of Physical Anthropology*. 2011, 145:426-437.
- [22]. Travascio, F. Eltoukhy, M. Asfour, S. Spine Biomechanics: A review of current approaches. *Spine Research*. 2015, 1(1:4)
- [23]. Watson, C. Paxinos, G. Kayalioglu, G. *The Spinal Cord*. Chapter 3 – The Vertebral Column and Spinal Meninges. Elsevier. 2008, 17-36.
- [24]. Yoganandan, N. Nahum, AM. Melvin, JW. *Accidental Injury Biomechanics and Prevention Third Edition*. Chapter 15 – Thoracic Spine Injury Biomechanics. Springer. 2015, 435-450.
- [25]. Zentrum für Chirurgie, AI. *Biomechanics of the Thoracic Spine – Development of a Method to Measure the influence of the Rib Cage on Thoracic Spine Movement*. Medicine. 2012.



Wsparcie Komisji Europejskiej dla produkcji tej publikacji nie stanowi poparcia dla treści, które odzwierciedlają jedynie poglądy autorów, a Komisja nie może zostać pociągnięta do odpowiedzialności za jakiegokolwiek wykorzystanie informacji w niej zawartych.

