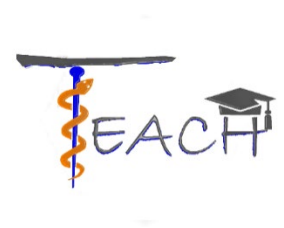


Development of innovative training solutions in the field of functional evaluation aimed at updating of the curricula of health sciences schools



MODUŁ BIOMECHANIKA KRĘGOSŁUPA

Jednostka dydaktyczna B

Temat: Zmiany biomechaniczne kręgosłupa



Index

1. CELE 2	
2. BIOMECHANIKA GŁÓWNYCH URAZÓW KRĘGOSŁUPA SZYJNEGO	3
2.1 Urazy górnego odcinka kręgosłupa szyjnego	3
2.1.1. Złamanie kłykcia kości potylicznej	4
2.1.2 Zwichnięcie stawu szczytowo-potylicznego	5
2.1.3. Złamania Atlasu	6
2.1.4. Zwichnięcie szczytowo-obrotowe	7
2.1.5. Fractures of the axis	8
2.2 Urazy dolnej części kręgosłupa szyjnego	9
2.2.1 Złamania	9
2.2.2 Złamanie typu spadającej łyzy	9
2.2.3 Midsagittal cleavage fracture	10
2.2.4 Przerwanie stawów międzywyrostkowych	10
2.2.5 Złamanie wyrostka kolczystego	10
2.2.6 Smagnięcie biczem (whiplash-associated disorders; WAD)	11
3. BIOMECHANIKA GŁÓWNYCH URAZÓW KRĘGOSŁUPA PIERSIOWEGO I LĘDŹWIOWEGO	14
3.1 Endplate fractures	14
3.2 Burst fractures	14
3.3 Złamania klinowe	15
3.4 Obrażenia spowodowane pasami bezpieczeństwa	16
4. ZAGADNIENIA BIOMECHANICZNE ZWIĄZANE Z INTERWENCJAMI DOTYCZĄCYMI KRĘGOSŁUPA	17
4.1 Interwencja w górnym odcinku szyjnym kręgosłupa	17
4.2 Interwencja w dolnym odcinku kręgosłupa szyjnego	18
4.3 Interwencja w odcinku piersiowym i lędźwiowym	19
5. KLUCZOWE ZAGADNIENIA	21
6. BIBLIOGRAFIA	22

1. Cele

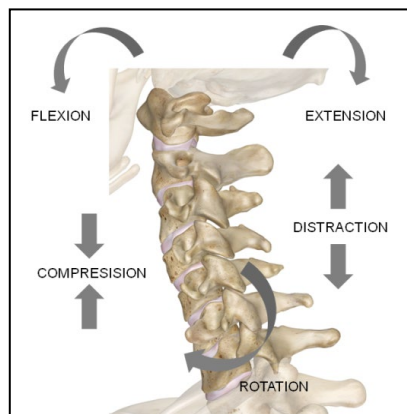
W tej jednostce dydaktycznej uczeń zostanie zapoznany z teoretycznymi aspektami biomechaniki różnych segmentów kręgosłupa w odniesieniu do głównych patologii i możliwych interwencji chirurgicznych oraz procedur leczenia.

Celami niniejszej jednostki dydaktycznej są:

1. Poznanie biomechaniki stojącej za głównymi patologiami kręgosłupa szyjnego, piersiowego i lędźwiowego.
2. Poznanie uwarunkowań biomechanicznych związanych z głównymi technikami interwencji w przypadku urazów kręgosłupa.

2. Biomechanika głównych urazów kręgosłupa szyjnego

Istnieje wiele powtarzalnych schematów urazów w zależności od kierunku i wielkości siły przyłożonej do najwyższego segmentu kręgosłupa. Zgięcie (i zgięcie boczne), rozciągnięcie, kompresja, ścinanie i rotacja (Ryc. 1) to podstawowe siły zewnętrzne, które mogą być stosowane na kręgosłup szyjny. Ze względu na funkcję tego segmentu (ustawianie głowy przy jednoczesnym zachowaniu stabilności i ochronie rdzenia kręgowego), zmiany chorobowe kręgosłupa szyjnego mogą mieć różny charakter, od zmian o niewielkim nasileniu do zagrażających życiu.



Rysunek 1 - Mechanizmy urazów kręgosłupa szyjnego. (Reprodukcja z: Cusick JF, Yoganandan N (2002) Biomechanics of the cervical spine 4: major injuries. Clin Biomech (Bristol, Avon) 17: 1–20.)
Źródło: www.innerbody.com.

2.1 Urazy górnego odcinka kręgosłupa szyjnego

Urazy tego typu stanowią 1/3 wszystkich urazów kręgosłupa szyjnego, a około 40% z nich kończy się śmiercią. Poziomy kręgosłupa szyjnego, które mogą ulec urazowi to:

- - Złamania kłykci kości potylicznej
- - Zwknięcie kości potylicznej
- - Złamania kości szczytowej
- - Zwknięcie stawu szczytowo-obrotowego
- - Złamania trzonu (axis)

Większość przypadków u młodszych pacjentów spowodowana jest wysokoenergetycznymi urazami, natomiast u osób starszych, ze względu na osteoporozę, potrzebna jest znacznie mniejsza energia i nawet zwykłe upadki mogą spowodować uraz kręgosłupa szyjnego. Dlatego też etiologia urazów może być różna. U młodszych pacjentów spowodowane są głównie przez wypadki samochodowe, motocyklowe i rowerowe oraz potrącenia pieszych przez samochody, natomiast w populacji osób starszych główną przyczyną są upadki.

Mechanizmami urazu są siła osiowa, hiperfleksja, hiper rozszerzenie, boczne zgięcie, rotacja i połączenie wszystkich. Objawy kliniczne mogą być różne, od bólu szyi, ograniczenia zakresu

ruchu, antagonistycznej pozycji głowy, uszkodzenia nerwów czaszkowych i różnych objawów neurologicznych od podrażnienia nerwów do niedowładu czterokończynowego.

Przypomnienie

Zwichnięcie definiuje się jako "przemieszczenie kości z jej naturalnej pozycji w stawie". Jest to sytuacja, w której dwie kości tworzące staw całkowicie oddzielają się od siebie.

Podwichnięcie definiuje się zasadniczo jako "częściowe zwichnięcie". Może być ono nie mniej bolesne niż pełne zwichnięcie, ale obie kości tworzące staw nadal częściowo stykają się ze sobą.

2.1.1. Złamanie kłykcia kości potylicznej

Złamania kłykci potylicznych (OCF) są rzadkimi urazami i są ważne, ponieważ mogą być związane z niestabilnością kompleksu stawów potyliczno-atlantoosiowych. Złamania OCF mogą łatwo pozostać niewykryte ze względu na zmienną prezentację i niemożność rozpoznania ich na zwykłym zdjęciu radiologicznym, jednakże są one wykrywane za pomocą tomografii komputerowej (CT), która jest złotym standardem w identyfikacji wszelkich przemieszczeń (Rys. 2) krwawienia w dotkniętym obszarze.



Rysunek 2 - Minimalnie przemieszczone złamanie prawego dolnego przyśrodkowego kłykcia potylicznego. Spiralna tomografia komputerowa kręgosłupa szyjnego została wykonana od podstawy czaszki w dół do wlotu klatki piersiowej przy grubości warstwy 2,5 mm. Źródło: Muhammad Waseem *et al.* 2014.

Najczęściej stosowana klasyfikacja OCF pochodzi od Andersona i Montesano (1988), którzy uwzględnili morfologię złamania, właściwą anatomię i biomechanikę (Tabela 1). W 1997 roku Tuli i współautorzy zaproponowali nowy system klasyfikacji uwzględniający badania obrazowe w celu wykrycia uszkodzenia więzadeł. Ta druga klasyfikacja przegrupowała różne typy złamań Andersona i Montesano (Rys. 3) i zaproponowała nową kategorię dla złamań z przemieszczeniem.

Tabela 1 - Anderson i Montesano (1988) Klasyfikacja złamań kłykci potylicznych (OCF)

Typ	Opis	Biomechanika	Stabilność
I	Zaklinowanie (Impaction)	Wynika z obciążenia osiowego; ipsilateralne więzadło skrzydłowe może być naruszone, ale stabilność jest utrzymywana przez kontralateralne więzadło skrzydłowe i błonę pokrywającą.	Złamanie stabilne
II	Rozszerzenie podstawy czaszki (Skull base extension)	Rozciąga się od kości potylicznej przez kłykiec i wchodzi do otworu wielkiego (foramen magnum); stabilność jest utrzymywana przez nienaruszone więzadła skrzydłowe i błonę pokrywającą	Złamanie stabilne
III	Oderwanie (Avulsion)	Pośredniczy w napięciu więzadła skrzydłowego; związane z tym przerwanie błony pokrywającej i przeciwległego więzadła skrzydłowego może powodować niestabilność	Złamanie niestabilne

Klasyfikacja wg Tuli i wsp.			
Klasyfikacja wg Andersona i Montesano	I	1	Bez przemieszczenia - Stabilne
	II	2A	Z przemieszczeniem – Stabilne; brak dowodów w obrazowaniu radiologicznym, tomografii komputerowej lub rezonansu magnetycznego na niestabilność potyliczno-atlanto-osiową lub zerwanie więzadeł
	III	2B	Z przemieszczeniem – Niestabilne; dodatni wynik obrazowania radiograficznego, TK lub MR potwierdzający niestabilność osi potyliczno-szczytowo-osiowej lub przerwanie więzadeł

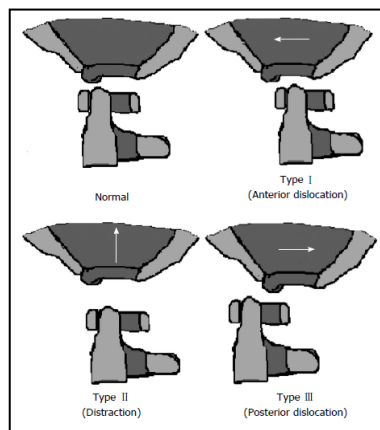
Figure 3 - Tuli et al. (1997) Classification of Occipital Condyle Fractures. From Hanson J. et al. 2002.

2.1.2 Zwichnięcie szczytowo-potyliczne

Zwichnięcie szczytowo-potyliczne (Atlantooccipital dislocation - AOD) lub dysocjacja potyliczna (Occipital dissociation - OCD) polega na odłączeniu kości potylicznej od kręgosłupa szyjnego. Dochodzi do tego głównie w wyniku działania sił dystrykcyjnych i rozciągających na potylicę w stosunku do atlasu, chociaż uraz może również wystąpić w wyniku hiperfleksji, zgięcia bocznego lub kombinacji wszystkich tych czynników. Ten mechanizm urazu może wystąpić podczas gwałtownych hamowań w pojazdach mechanicznych, będąc częstą

przyczyną śmierci w wypadkach samochodowych z powodu przecięcia pnia mózgu lub tętnic kręgowych, które może spowodować AOD. AOD występuje częściej u dzieci, ponieważ stosunek głowy do ciała w dzieciństwie zwiększa bezwładność urazową niezbędną do powstania tego typu urazu. Kłykcie potyliczne dzieci są mniejsze, głowa jest większa w stosunku do ciała, więzadła szczytowo-potyliczne są bardziej luźne, a płaszczyzny artykulacji połączeń czaszkowo-kręgowych są bardziej poziome w porównaniu z dorosłymi, co podsumowuje fakt, że połączenia czaszkowo-kręgowe u dzieci są mniej stabilne niż u dorosłych.

AOD został sklasyfikowany przez Traynelisa i wsp. w 1986 roku w trzech typach urazów (Ryc. 4). Typ I to przednie przemieszczenie kości potylicznej w stosunku do atlasu, typ II to rozproszenie kości potylicznej w stosunku do atlasu, a typ III to tylne przemieszczenie kości potylicznej w stosunku do atlasu.



Rysunek 4 – Klasyfikacja wg Traynelisa. Źródło: Hall GC. et al. 2015.

2.1.3. Złamania kręgu szczytowego - Atlasu

Złamania atlasu stanowią 3-13% wszystkich urazów kręgosłupa szyjnego i są związane z urazowym osiowym obciążeniem głowy przez potylicę na boczne masy C1. Jednakże, inne siły mogą spowodować złamanie atlasu, w tym siły rozciągające, zginające i rotacyjne. Podczas gdy te złamania są często opisywane jako złamania Jeffersona, złamanie Jeffersona właściwie odnosi się do szczególnego czteroczęściowego złamania atlasu, które występuje z obustronnymi złamaniami przedniego i tylnego łuku atlasu (Rysunek 5.A). W zależności od różnych kombinacji sił przyłożonych jednocześnie z kompresją osiową, może wystąpić izolowane złamanie łuku przedniego (Rysunek 5.C) lub tylnego (Rysunek 5.D) lub jednostronne złamanie masy bocznej (Rysunek 5.B). W połączeniu ze złamaniem Atlasu może dojść do uszkodzenia więzadła poprzecznego, co umożliwia nadmierną ruchomość C1-C2.

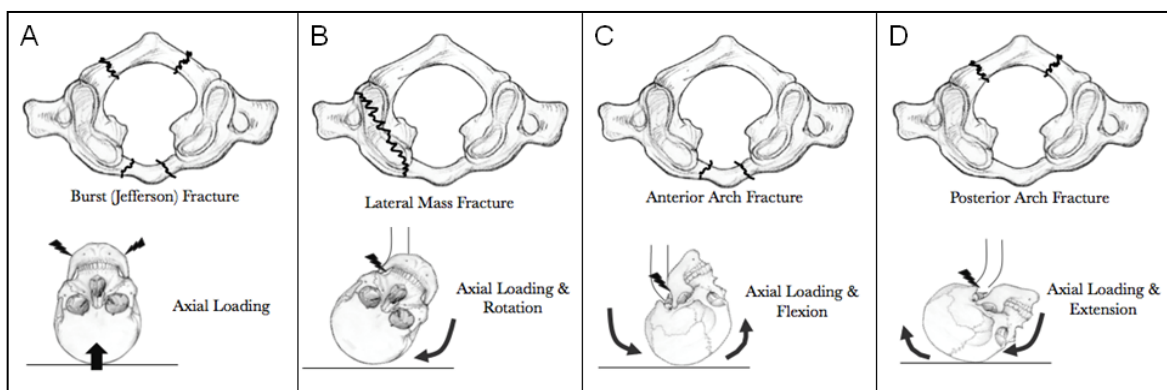


Figure 5 - Złamania kręgów w Atlasie. A: Złamanie Jeffersona spowodowane działaniem siły osiowej. B: Złamanie masywu bocznego spowodowane obciążeniem osiowym i rotacją. C: Złamanie łuku przedniego spowodowane siłą osiową i zgięciem. D: Złamanie łuku tylnego spowodowane siłą osiową i rozciągającą. Źródło: www.ebconsult.com.

2.1.4. Zwichnięcie szczytowo-obrotowe

Zwichnięcie szczytowo-obrotowe odnosi się do utraty stabilności pomiędzy Atlassem a kręgiem obrotowym (C1-C2), co skutkuje utratą normalnej artykulacji. Stawy szczytowo-osiove mogą utracić stabilną artykulację w wyniku urazu, zapalenia, idiopatii lub wrodzonych nieprawidłowości. Uszkodzenie stawu szczytowo-obrotowego spowodowane urazem bez wcześniejszego uszkodzenia jest niezwykle rzadką jednostką chorobową. Powstaje on w wyniku działania siły zginającej/ściskającej, która powoduje przerwanie więzadła poprzecznego atlasu. Rzadko, uszkodzenie więzadła poprzecznego może wiązać się z jednoczesnym przerwaniem więzadeł szczytowego i poprzecznego. W tych zwichnięciach więzadłowych, kość szczytowa traci artykulację z densem, a przedni łuk kręgowy może ulec całkowitemu przemieszczeniu ku górze i tyłowi przy znacznym uszkodzeniu więzadeł.

Objawy zwichnięcia stawu szczytowo-obrotowego mogą wahać się od niewielkiego osiowego bólu szyi do śmierci. Tabela 2 przedstawia objawy kliniczne wynikające z tej zmiany.

Tabela 2 – Objawy kliniczne zwichnięcia szczytowo-obrotowego (Yang *et al.* 2014)

Mniej poważne objawy	Objawy umiarkowane	Najcięższe objawy
<ul style="list-style-type: none"> U około 50% pacjentów występuje ból szyi i/lub ograniczenie ruchów szyi. U 70% pacjentów występuje osłabienie i/lub drętwienie U 90% pacjentów występują objawy piramidowe 	<ul style="list-style-type: none"> Zaburzenia zwieraczy Dysfunkcja dolnych nerwów czaszkowych Zaburzenia oddychania 	<ul style="list-style-type: none"> Mielopatia Niewydolność oddechowa Rozwarstwienie tętnicy kręgowej Zaburzenia neurologiczne Rzadko niedowład czterokończynowy Śmierć w przypadku nieleczenia

Zmiana ta może być określona na podstawie radiograficznych pomiarów artykulacji stawu szczytowo-obrotowego za pomocą odstępu szczytowo-obrotowego (Atlantodental Interval - ADI). ADI to niewielka szczytowa przestrzeń (odległość pozioma) pomiędzy przednim łukiem kości szczytowej a densem osi. Radiogramy zgięcia i wyprostowania szyi pozwalają na pomiar ADI i określenie czy staw szczytowo-obrotowy redukuje się w tych pozycjach. ADI jest mierzony od linii poprowadzonej ku górze wzdłuż przedniej granicy trzonu kości szczytowej do przedniego łuku kości szczytowej (rysunek 6).

ADI jest zazwyczaj stałą odległością podczas ruchu głowy i zazwyczaj nie przekracza 3 mm u dorosłych i 5 mm u dzieci. Większość (70%) przypadków klinicznych zwichnięć stawu

szczytowo-obrotowego jest spowodowana zwichnięciami przednimi. Przednie zwichnięcie zwiększa ADI, zmniejszając przestrzeń dostępną dla rdzenia kręgowego, która jest mierzona od tylnego aspektu densu do przedniego aspektu tylnego pierścienia szczytowego. Zmniejszenie przestrzeni dostępnej dla rdzenia kręgowego zwiększa ryzyko ucisku rdzenia kręgowego, jak również następstw neurologicznych. Zwraca uwagę fakt, że przestrzeń dostępna dla rdzenia kręgowego, wynosząca mniej niż 14 mm, przewiduje rozwój porażenia i wykazano, że koreluje z ciężkością porażenia..



Rysunek 6 - Zdjęcia rentgenowskie boczne w pozycji neutralnej (po lewej), wyprostowanej (pośrodku) i zgiętej (po prawej) ukazujące odstęp szczytowo-obrotowy (ADI) przed wyrostkiem zębodołowym i przestrzeń dostępną dla rdzenia kręgowego po stronie tylnej. ADI jest powyżej średniej dla dorosłych wynoszącej 3 mm i jest nieznacznie zmniejszony w wyproście, ale znacznie zwiększony w zgięciu. U tego pacjenta przestrzeń dostępna dla rdzenia kręgowego (SAC) zmniejszająca się poniżej 14 mm wskazując na ryzyko porażenia. Źródło: Yang *et al.* 2014.

2.1.5. Złamania kręgu obrotowego (Axis)

Złamania Axis należą do najczęstszych złamań kręgosłupa szyjnego, stanowiąc około 10% wszystkich urazów kręgosłupa szyjnego. Urazy te są zwykle mało widoczne klinicznie, chyba że powodują ucisk rdzenia kręgowego, co jest rzadkie ze względu na stosunkowo duży SAC na tym poziomie w kręgosłupie szyjnym. Złamania kręgu obrotowego mogą być spowodowane zarówno przez siły rozciągające jak i zginające. Gdy przyczyną złamania Axis jest siła zginająca/ściskająca, dochodzi do przedniego przemieszczenia C1 na C2, choć może to być również następstwem urazu spowodowanego rozciągnięciem. Złamania Axis są klasyfikowane według Andersona i D'Alonzo:

- Złamania typu 1 występują na czubku odontoidu i są zazwyczaj leczone nieoperacyjnie.
- Złamania typu 2 przebiegają przez talię wyrostka zębodołowego. Złamania te charakteryzują się wysokim wskaźnikiem braku zrostu z powodu słabego zaopatrzenia naczyniowego. Złamania typu 2 są zazwyczaj leczone operacyjnie (halo versus fuzyja tylna C1-C2), chyba że występują u pacjenta w podeszłym wieku z chorobami współistniejącymi, które uniemożliwiają leczenie operacyjne.
- Złamania typu 3 sięgają do trzonu C2 i zazwyczaj mogą być leczone bezoperacyjnie.

Dodatkowo, wyrostek odontoidalny odpowiada za około 37% sztywności kompleksu C1-C2; otaczające go więzadła (więzadło skrzydłowe, więzadło poprzeczne, więzadło podłużne przednie i tylne) odpowiadają za pozostałą sztywność. Jeśli oprócz złamania odontoidalnego w badaniu rezonansu magnetycznego (MRI) widoczne jest uszkodzenie tych więzadeł, może to wskazywać na niestabilność kompleksu C1-C2; sytuacja taka może wymagać leczenia operacyjnego.

Inną klasą urazów C2 jest traumatyczna spondylolisteza kręgu obrotowego, opisująca złamanie wydłużonego pars interarticulares tylnego łuku drugiego kręgu szyjnego. Został on historycznie przypisany do hiperekstensji i rozproszenia (napięcie i obrót głowy do tyłu), które mogą wynikać z uderzeń w twarz i podbródek lub z sądowego powieszenia. Do urazowych spondylolistez osiowych zalicza się złamanie kata (Hangman's Fracture). Pęknięcie krążka międzykręgowego C2-C3 towarzyszy złamaniu pars i powoduje dramatyczną niestabilność w poważniejszych postaciach urazu. Wypadki samochodowe zastąpiły powieszenia jako najczęstszą przyczynę tych często śmiertelnych urazów.

Kiedy górny odcinek szyjny kręgosłupa jest zdestabilizowany i równowaga strzałkowa jest zaburzona, dolny odcinek szyjny kompensuje to, co może prowadzić do patologii i deformacji podosiowych. Kiedy zwichnięcie stawu szczytowo-obrotowego powoduje zmniejszenie lordozy w odcinku C0-C2, podosiowy odcinek szyjny kompensuje to zwiększeniem lordozy w celu utrzymania równowagi. U niektórych pacjentów z końcowym stadium zmian może dojść do kifozy w odcinku potyliczno-osiowym wraz ze skrajną hiperlordozą podosiową, co prowadzi do deformacji szyi łabędziej.

2.2 Urazy dolnej części kręgosłupa szyjnego

Podsubiektywne urazy kręgosłupa szyjnego lub dolnego odcinka kręgosłupa szyjnego reprezentują szeroki wachlarz wzorów urazów i stopni niestabilności pomiędzy poziomami C3 i T1. Niniejszy rozdział opisuje najczęściej opisywane w literaturze uszkodzenia oraz biomechanikę każdego z nich.

2.2.1 Złamania

Osiowe obciążenie kręgosłupa szyjnego z karkiem w pozycji neutralnej spowoduje złamanie kompresyjne lub pęknięcie trzonu kręgu i może wystąpić w dolnym odcinku szyjnym od poziomu C3 do T1. W tym przypadku nie działa siła zginająca, a więc tylny kompleks więzadłowy powinien być nienaruszony. Podczas przenoszenia osiowego ucisku przez trzon kręgu dochodzi do przedniej deformacji klinowej trzonu kręgu. Jeśli siła ta będzie się utrzymywać, tylna część trzonu kręgu zostanie cofnięta do kanału kręgowego, potencjalnie powodując uszkodzenie rdzenia kręgowego.

2.2.2 Złamanie typu spadającej łzy

Złamania typu spadającej łzy występują, gdy na kręgosłup działa jednocześnie połączenie sił zgięcia i kompresji osiowej. Najczęściej uraz ten może wystąpić, gdy osoba nurkuje głową w dół do płytkiego basenu. W wyniku kompresji przednia część kręgosłupa szyjnego ulega

uszkodzeniu, a tylna część trzonu kręgu zostaje cofnięta do kanału kręgowego. W podosiowym odcinku kręgosłupa szyjnego jest mniej miejsca dla rdzenia kręgowego, co często prowadzi do ucisku rdzenia i jego uszkodzenia. W najcięższym przypadku dochodzi do tylnego podwichnięcia tylnej części trzonu kręgu do kanału kręgowego, ostrej kifozy oraz przerwania więzadła podłużnego przedniego i tylnego, z tego powodu złamania typu spadającej ły są ciężkimi urazami związanymi z dużą częstością występowania niedowładu czterokończynowego.

2.2.3 Złamanie kręgosłupa z rozszczepem strzałkowym (Midsagittal cleavage fracture)

Jedną z odmian złamań typu burst jest złamanie rozszczepowe środkowo-poprzeczne. Najczęstszymi miejscami występowania tego typu złamań w dolnym odcinku kręgosłupa szyjnego są kręgi C4, C5 i C6. Ponieważ kręgi stanowią zamknięty pierścień kostny, całkowitemu złamaniu przez przednią i tylną korę trzonu kręgu często towarzyszą złamania blaszek i przerwanie ciągłości stawów twarzowych. Są to urazy rażąco niestabilne, a fragmenty kostne, często o trapezowatym kształcie, ulegają przemieszczeniu ku tyłowi i nachodzą na rdzeń kręgowy.

2.2.4 Zwichnięcie stawów międzykręgowych

Zwichnięcie stawu międzywyrstkowego powstaje w wyniku działania na kręgosłup szyjny siły zgięcia/rozprostowania w połączeniu z siłami rotacyjnymi. Zwykle dotyczy to poziomów C4-C5 lub C5-C6. Dolna powierzchnia stawowa wyższego poziomu szyjnego przesuwają się nad górną powierzchnią stawową niższego poziomu szyjnego. Może to wystąpić jednostronnie lub obustronnie i może również obejmować złamanie jednej lub obu stawów i/lub części bocznych:

- W jednostronnych zwichnięciach stawów, siły działające na kręgosłup szyjny mają głównie charakter zgięciowy i obrotowy. Objawem jest często monoradikulopatia korzenia nerwu wyjściowego.
- W obustronnych zwichnięciach faset mniejsza jest siła rotacyjna, a większa siła zgięcia/rozprostowania działająca na kręgosłup szyjny. Pozwala to na obustronne przemieszczenie się dolnej powierzchni stawowej górnej części kręgosłupa szyjnego do przodu w stosunku do górnej powierzchni stawowej dolnej części kręgosłupa szyjnego.

2.2.5 Złamanie wyrostka kolczystego

Polega na pęknięciu jednego lub kilku wyrostków kolczystych w dolnej części odcinka szyjnego kręgosłupa. Zwykle określane jest jako złamanie koparkowe, ponieważ występuje u osób wykonujących tę czynność. Mechanizm urazu polega na przeniesieniu przez mięśnie siły o dużej wartości z obręczy barkowej na wyrostek kolczysty. Do złamania może dojść również w wyniku zmęczenia mięśni. Powstały wektor siły przekazanej na wyrostek kolczysty jest poziomy, co początkowo działa na przyłączenie obręczy barkowej do kręgosłupa i klatki piersiowej.

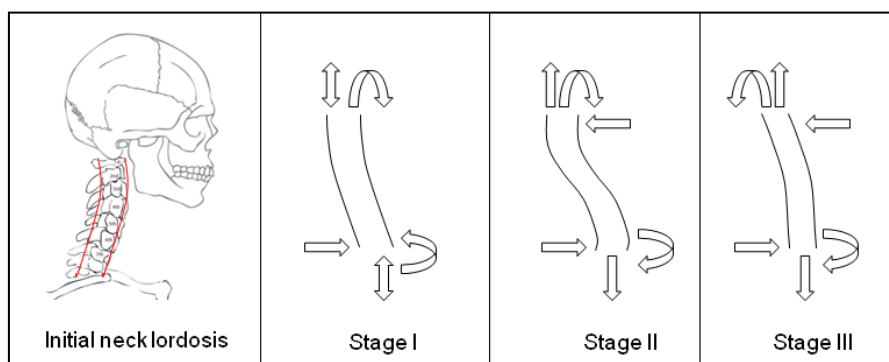
Większość z tych złamań zlokalizowana jest na poziomie C6 i C7, ponieważ są to kręgi o największej długości wyrostków kolczystych i dlatego nie są w stanie wytrzymać dużych momentów zginających generowanych przez siły poziome, powodując złamanie wyrostków kolczystych blisko trzonu kręgu.

2.2.6 Uraz „smgnięcia biczem” (whiplash-associated disorders; WAD)

Termin "smgnięcie biczem" jest używany do opisu klinicznych objawów urazu biczowego. Uraz biczowy jest mechanizmem przyspieszenia i opóźnienia, który powoduje przeniesienie energii na szyję. Może być skutkiem zderzenia tylnego lub bocznego pojazdów mechanicznych, ale może również wystąpić podczas nurkowania lub innych wypadków.

Ustalono, że sekwencja kinematyczna, która zachodzi w głowie i szyi po uderzeniu jest następująca (rys. 7) (Luan F. i inni, 2000),:

- 1) W pierwszym etapie (0-100 ms od początku uderzenia) obserwuje się deformację zgięciową szyi wraz z utratą lordozy szyjnej. Początkowa lordotyczna szyja po 20 ms staje się prosta. Po 50 ms zarówno górny, jak i dolny odcinek szyjny są poddawane momentowi zginającemu. Siła ścinająca jest początkowo przenoszona przez dolne poziomy, a ostatecznie przez górne poziomy, ale nie dociera do górnego końca kręgosłupa szyjnego. Siła osiowa zmienia się następnie ze ściskającej na rozciągającą po około 60 ms..
- 2) W drugim etapie (100-130 ms), kręgosłup szyjny przybiera krzywiznę w kształcie litery S, ponieważ dolne kręgi zaczynają się wydłużać i stopniowo powodują wydłużanie się górnych kręgów. Ostatecznie, wyprostowana szyja ponownie staje się lordotyczna. Moment rozciągający występuje na dolnych kręgach, podczas gdy moment zginający działa na górnych poziomach. Siły ścinające działają na wszystkich poziomach wraz z rozciągającą siłą osiową.
- 3) W końcowej fazie (po 130 ms) cała szyja jest wyprostowana z powodu momentów rozciągających na obu końcach. Siły ścinające i rozciągające siły osiowe nadal działają na wszystkich poziomach. Siły ścinające podczas fazy obciążenia mogą powodować nadmierne rozciąganie dolnych FJC, podczas gdy początkowa kompresja kręgosłupa szyjnego może powodować miejscowe ściskanie torebek stawu międzykręgowego i przesuwanie się wzdłuż stawu. Najbardziej tylne obszary stawu uciskają się bardziej niż te najbardziej przednie, wykazując mechanizm „szczypania”. Nadmierne uciskanie / przesuwanie stawów może również wywoływać ból, jeśli te stawy zawierają struktury wrażliwe na ból.



Rysunek 7 - Modele deformacji szyi oraz wykresy siły i momentu na trzech etapach zderzenia tylnego.
Źródło: Luan F. I inni 2009.

W podobny sposób Kaneoka K. i wsp. (2002) przeprowadzili badania na ochotnikach siedzących na sankach w celu symulacji przyspieszenia tylnego zderzenia samochodu (Rys.3). Prędkość uderzenia wynoszącą 8 km/h wykorzystano do badania kinematyki głowy, szyi i tułowia oraz odpowiedzi kręgosłupa szyjnego. Autorzy podzielili reakcje na cztery fazy (patrz. Tabela 3).

Tabela 3 - Fazy i zdarzenia kinematyczne szyi, kręgosłupa szyjnego i tułowia podczas zderzenia tylnego (Kaneoka K. et al. 2002).

Faza 1: Ruch sań	Faza 2: Siła osiowa szyi	Faza 3: Siła osiowa i ścinająca	Faza 4: Pełne wydłużenie
0-40 ms	40-100 ms	100-160 ms	150-220 ms
a. Siedzenie zaczyna naciskać na plecy wolontariusza	a. Tułów przesuwa się do przodu - popychany przez oparcie siedzenia	a. Sanki spowalniają odbicie tułowia i poruszają się do przodu z pewną rotacją w tył	a. Tułów porusza się do przodu i w dół
b. Kręgosłup zaczyna się prostować	b. tułów przesuwa się do góry - równoległe do nachylenia siedzenia, powodując osiowy ucisk kręgosłupa szyjnego spowodowany bezwładnością głowy, który osiąga maksimum	b. Siła osiowa na szyi zmniejsza się, podczas gdy siła ścinająca na szyi osiąga wartość szczytową w czasie około 120 ms	b. Obrót głowy i szyi osiąga pełny wyprost
c. Ruch w odcinku szyjnym nie nastąpił	c. Głowa pozostaje nieruchoma z powodu bezwładności, z lekkim początkowym zgięciem	c. Głowa zaczyna obracać się w kierunku przedłużenia	c. Siły ścinające i osiowe w szyi zmniejszają się
d. Brak reakcji mięśniowej w szyi	d. C6 obraca się wcześniej w kierunku wyprostowania niż górne segmenty kręgosłupa (C3, C4 i C5)	d. Kręgosłup szyjny ustawia się do wyrównania w wyproście	d. Wyładowanie mięśniowe kończy się po około 220 ms.
	e. Kręgi szyi przyjmują kształt litery "S" z	e. EMG mięśnia mostkowo-	

	górnym odcinkiem w zgięciu i dolnym w wyproście	obojczykowo-sutkowego rozładowuje się od około 115 ms	
	f. Brak reakcji mięśniowej w szyi		

3. Biomechanika głównych urazów kręgosłupa piersiowego i lędźwiowego

Duża różnica między kręgosłupem szyjnym a piersiowym i lędźwiowym polega na tym, że ten ostatni ma sztywność, której nie ma kręgosłup szyjny, dlatego mechanizmy powstawania urazów są między nimi bardzo różne.

3.1 Złamania płyty czołowej

Złamania płytki czołowej powstają pod wpływem sił ściskających i dotyczą głównie odcinka piersiowego i górnego odcinka lędźwiowego kręgosłupa. Są powodowane przez osiowe siły ściskające, ale mogą również występować z powodu siły zginającej lub ich kombinacji. Istnieją trzy rodzaje złamań, które obejmują płytki czołowe:

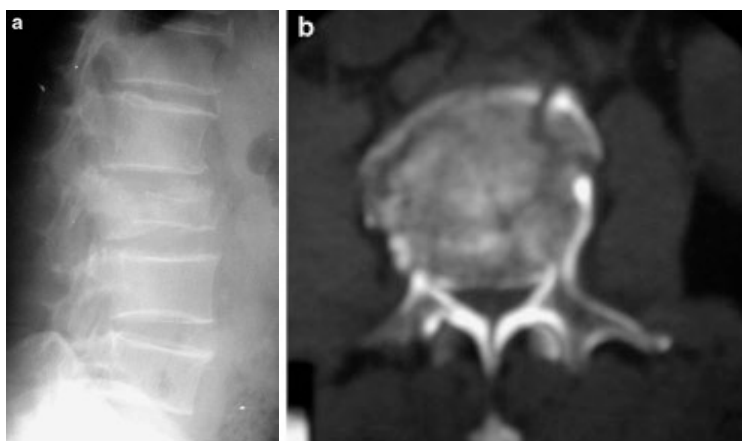
- Złamania zlokalizowane tylko w środkowej części płytki czołowej.
- Złamania zlokalizowane w okolicy obwodowej obejmują zewnętrzną część kości korowej wyściełającej trzonę kręgów.
- Poprzeczne pęknięcia, które przecinają płytkę czołową z części na część.

Uszkodzenie płytki czołowej odgrywa główną rolę w rozwoju pęknięć, umożliwiając jądro przerwanie płytki czołowej czaszki, zwiększając ciśnienie międzykręgowe i prowadząc do skierowanego na zewnątrz przemieszczenia skorupy korowej z fragmentacją.

3.2 Złamanie wybuchowe (burst fracture)

Siły odpowiedzialne za pęknięcie kręgu (Ryc. 8) to siły kompresyjne o dużej wartości, które najczęściej towarzyszą upadkom i wypadkom komunikacyjnym. Skutkiem złamania wybuchowego jest przednie i tylne złamanie trzonu, utrata wysokości trzonu oraz retropulsja tylnej części trzonu kręgu do kanału kręgowego. Szczególnie podatny na tego typu złamania jest odcinek piersiowo-lędźwiowy, czyli od T11 do L2. W rzeczywistości jest on uważany za biomechanicznie najsłabszy punkt kręgosłupa, ponieważ stanowi strefę przejściową od segmentu sztywnego do ruchomego, postawy lordotycznej i bardziej strzałkowo zorientowanych stawów twarzowych. Stabilność w tej strefie zależy od integralności więzadeł i elementów kostnych.

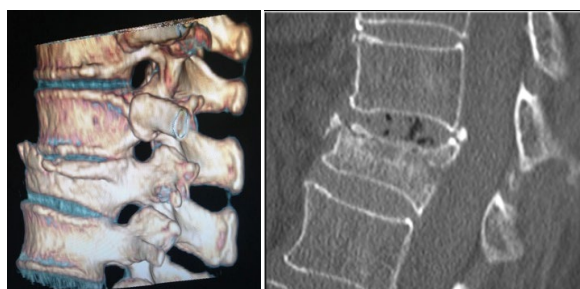
Deficyt neurologiczny jest najmniejszy w złamaniach połączenia piersiowo-lędźwiowego w porównaniu z kręgosłupem szyjnym, gdzie uszkodzenie neurologiczne jest największe u chorych ze złamaniami rozrywającymi niezależnie od mechanizmu wypadku. Złamanie wybuchowe może być stabilne lub niestabilne, częściowo w zależności od rozerwania więzadła podłużnego tylnego. Denis F. (1983) zaproponował, aby uraz kolumny środkowej tj. tylnej części trzonu kręgu, więzadła podłużnego tylnego i tylnego dysku był wystarczający do powstania niestabilności. Powszechnie przyjmuje się, że więzadła tylne prawdopodobnie uległy uszkodzeniu, jeżeli występuje ponad 30° kifoza i/lub 50% utrata wysokości trzonu kręgowego na zwykłych zdjęciach radiologicznych (Heary RF. i wsp. 2007). Denis F. (1983) również sklasyfikował złamania niestabilne na trzy typy: mechaniczne (I stopnia), neurologiczne (II stopnia) lub kombinowane mechaniczne/neurologiczne (III stopnia).



Rysunek 8 - a) Zdjęcie radiologiczne boczne ukazuje złamanie trzonu kręgu L2 u 59-letniego mężczyzny. b) Obraz osiowej tomografii komputerowej ukazuje uszkodzenie kanału w 70%. Źródło: Altay M. et al. 2007.

3.3 Złamania klinowe

Złamania klinowe trzonów kręgów są urazem, który powstaje w wyniku działania osiowej siły ściskającej na trzon kręgu w połączeniu z momentem zgięcia, który powoduje mechaniczne uszkodzenie przedniej części trzonu kręgu. Złamania te nazywane są również złamaniami kompresyjnymi. Aby doszło do tego typu złamania, linia działania siły ściskającej musi być umiejscowiona przednio w stosunku do środka trzonu kręgu. Często tego typu złamaniom może towarzyszyć uszkodzenie więzadeł tylnych, które również muszą zatrzymać momenty zginające powstałe w wyniku działania siły osiowej, która uderza w przednią część kręgu.



Rysunek 9 - Złamanie klinowe kompresyjne z rekonstrukcji wielopłaszczyznowej w płaszczyźnie strzałkowej. Uraz bez zajęcia elementów tylnych.. Źródło: González-Montané J.L. 2014.

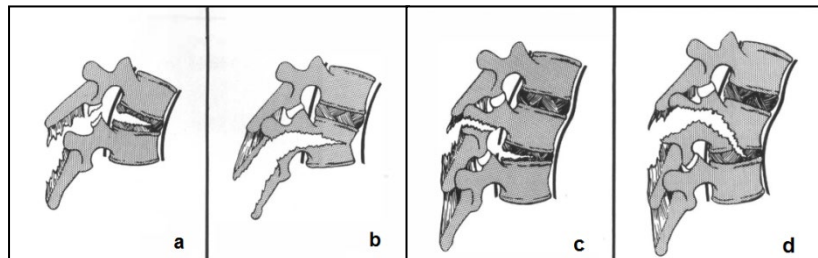
Ten typ zmian jest częsty u osób z osteoporozą. U tego typu pacjentów złamania kręgosłupa występują częściej w odcinku środkowo-piersiowym (T7-T8) i piersiowo-łędźwiowym (T11-L1) niż w innych miejscach kręgosłupa. Przyczyny tego dwumodalnego rozkładu są prawdopodobnie związane z różnicami w krzywiznie kręgosłupa, gdzie maksymalna kifoza piersiowa występuje w okolicy T7-T8, co może skutkować większymi przednimi momentami zginającymi i zwiększać ryzyko przednich złamań klinowych w tej okolicy. W miejscu połączenia piersiowo-łędźwiowego większa częstość złamań na poziomie T12-L1 jest

spowodowana zwiększonym obciążeniem trzonów kręgow, ponieważ klatka piersiowa nie wspomaga już obciążeń superincumbentnych na tych poziomach kręgosłupa.

3.4 Obrażenia spowodowane pasami bezpieczeństwa

Urazy spowodowane pasem bezpieczeństwa to typowe zmiany w obrębie połączenia piersiowo-lędźwiowego, powstałe w wyniku hiperfleksji skoncentrowanej we wspomnianym obszarze, która jednocześnie wywołuje siłę rozpraszającą z najbardziej tylnego obszaru kręgu. Mechanizm urazu polega na gwałtownym wyhamowaniu osoby podróżującej w pojeździe, której poprzedni ruch został zatrzymany przez pas bezpieczeństwa. Konsekwencje tego urazu mogą być różne, od uszkodzenia struktur więzadłowych, do złamania elementów kostnych lub kombinacji złamania i zwichnięcia.

Denis (1985) podzielił złamania spowodowane pasami bezpieczeństwa na cztery typy (Rysunek 10). Pierwszy typ to czyste zaburzenie więzadłowe z przemieszczeniem części twarzowej; drugi typ to klasyczne złamanie typu Chance z poziomym rozszczepieniem kości; trzeci typ to dwupoziomowe uszkodzenie tylnego kompleksu więzadłowego, trzonu i dysku, a czwarty typ to dwupoziomowe uszkodzenie tylnego kompleksu więzadłowego, trzonu i dysku. Podczas gdy istnieje ogólna zgoda co do tego, że czysty uraz więzadłowy ze zwichnięciem typu złamania pasa bezpieczeństwa jest niestabilny, istnieje mniejsza zgodność co do stabilności pozostałych typów urazów pasa bezpieczeństwa.



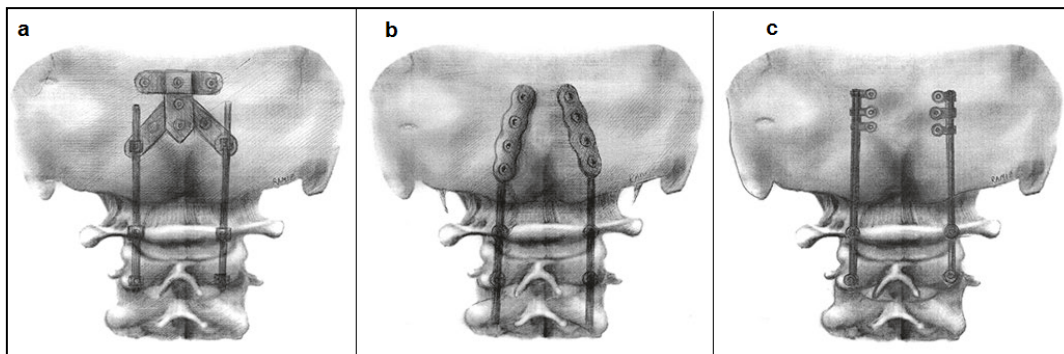
Rysunek 10 - Klasyfikacja złamań pasów bezpieczeństwa. a: Czyste rozerwanie więzadła z przemieszczeniem części twarzowej. b: Złamanie szkieletowe z poziomym rozszczepieniem kości. c: Uszkodzenie tylnego kompleksu więzadłowego, szczytu i dysku. d: Uszkodzenie tylnego kompleksu więzadłowego, szczytu, trzonu i dysku. a i b to urazy na jednym poziomie. c i d to urazy na dwóch poziomach. Źródło: Yu WY. et al. 1986.

4. Uwarunkowania biomechaniczne związane z interwencjami dotyczącymi kręgosłupa

Leczenie medyczne stosowane w przypadku urazów kręgosłupa może być zazwyczaj zachowawcze lub chirurgiczne, w zależności od ciężkości urazu i stabilności uszkodzonego segmentu kręgu. Różne decyzje medyczne mogą mieć istotny wpływ na funkcjonalność, ponieważ będą powodować biomechaniczne zmiany w funkcjonowaniu kręgów w celu naprawy lub stabilizacji uszkodzenia. W tym rozdziale dokonamy przeglądu możliwych biomechanicznych konsekwencji najpoważniejszych interwencji w segmentach kręgosłupa najbardziej podatnych na urazy.

4.1 Interwencje w górnym odcinku kręgosłupa szyjnego

Kompleks potyliczny – C1 – C2 jest najbardziej ruchomą częścią odcinka szyjnego kręgosłupa. Segment ruchu potylicy – C1 ma największy udział w zgięciu (21°) i wyproście ($3,5^\circ$), podczas gdy głównym ruchem segmentu ruchu C1 – C2 jest obrót osiowy ($23,3\text{--}38,8^\circ$ na stronę). Głównym wskazaniem do zrostu potyliczno-szyjnego jest niestabilność połączenia potyliczno-szyjnego. Wiele schorzeń może powodować niestabilność tego kompleksu, np. urazy (zwichnięcie atlasowo-potyliczne, złamanie kłykcia potylicznego, złamania atlasu i osi), nowotwory złośliwe, reumatoidalne zapalenie stawów, wady wrodzone czy choroby zakaźne. Tylina stabilizacja wewnętrzna zapobiega uciskowi struktur nerwowych, umożliwia korektę deformacji odcinka szyjnego kręgosłupa i zmniejsza dolegliwości bólowe. Obecnie najbardziej popularne są konstrukcje oparte na śrubach (Rysunek 11).



Rysunek 11 - Najbardziej powszechne konstrukcje oparte na śrubach. (a) Płytkę potyliczną. (b) Pręty przegubowe z wbudowanym zakończeniem płytki potylicznej. (c) Łączniki oczkowe skierowane przyśrodkowo. Źródło: Ashafai NS. et al. 2019.

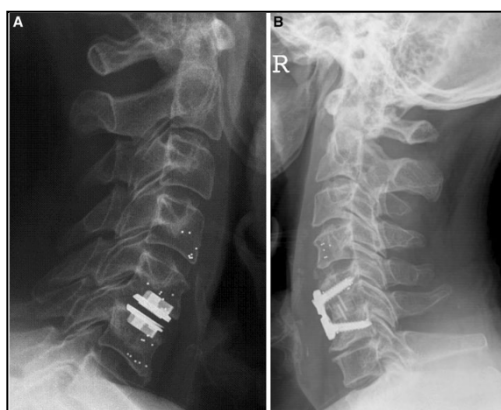
Powikłania kinematyczne wynikające z zespolenia potyliczno-szyjnego polegają na tym, że technika ta może ograniczyć ruchomość szyjki macicy do 40% całkowitego zgięcia-wyprostu szyi, 60% całkowitej rotacji karku i 10% całkowitego zgięcia boczno-szyi, jeśli dotyczy to odcinka potylicznego-C1 i C2. Ponadto, nadmierne zgięcie powoduje, że pacjent ma zaburzoną linię wzroku i trudności w połykaniu. Dusznosc pooperacyjna i/lub dysfagia po zabiegu fuzji potyliczno-szyjnej występują rzadko, ale stanowią przeszkodę w wykonywaniu

codziennych czynności życiowych, a niekiedy zagrażają życiu. Mimo, że za główny czynnik powodujący duszność i/lub dysfagię uważa się zgięciowe ustawienie kręgosłupa szyjnego, to jednak mechaniczne zwężenie przestrzeni ustno-gardłowej również przyczynia się do powstania tego problemu po operacji zespolenia potyliczno-szyjnego. Zmniejszenie kąta O-C2 o 10° powoduje zmniejszenie przestrzeni ustno-gardłowej w pozycji neutralnej o około 37%.

Przeprowadzone niedawno badania porównały procedury tylnej fiksacji stawu szczytowo-obrotowego z potyliczno-szyjnym. Zabieg atlanto-osiowy jest bardziej wymagający w porównaniu do fuzji potyliczno-szyjnej, ale zapewnia większy zakres ruchu poprzez zachowanie ruchu segmentu C0/C1. Fuzja potyliczno-szyjna prowadzi do dalszego i znacznego ograniczenia ruchu w porównaniu z samą fuzją szczytowo-osiową. Po zespoleniu potyliczno-szyjnym praktycznie nie występuje wyprost, zgięcie i rotacja w górnym odcinku szyjnym kręgosłupa.

4.2 Interwencja w dolnym odcinku kręgosłupa szyjnego

W przypadku dolnego odcinka kręgosłupa szyjnego należy wziąć pod uwagę różne uwarunkowania. Unieruchomienie lub wymiana stawu może mieć wpływ na sąsiednie poziomy ze względu na zmiany biomechaniczne, które zachodzą po interwencji. Nabhan A. i wsp. (2011) analizują możliwe efekty na poziomach sąsiadujących z wymianą dysku w porównaniu z przednią dysektomią szyjną i fuzją (Rysunek 12) u osób z objawową chorobą zwyrodnieniową dysku szyjnego. W tym badaniu, po średnim okresie obserwacji 12 miesięcy, nie stwierdzono zmiany średniego ruchu segmentowego bezpośrednio od czaszki do protezy dysku, natomiast nastąpił wzrost średniego ruchu segmentowego bezpośrednio do zrostu, ale bez istotnej różnicy.



Rysunek 12 - Zdjęcie RTG boczne kręgosłupa szyjnego przedstawiające markery tantalowe trzonów kręgów C4, C5 i C6. a - Wbudowane markery tantalowe po wymianie dysku. b - To samo z płytą tytanową. Źródło: Nabhan A. et al (2011).

Przypuszcza się, że obecność fuzji może zwiększać obciążenie i segmentalny zakres ruchu na sąsiednich poziomach oraz powodować zlokalizowany uraz z następowym przyspieszonym zwyrodnieniem dysku. Istnieje wiele potencjalnie ważnych czynników związanych z rozwojem

choroby przyległych segmentów obok zwiększonego ruchu segmentów: naprężenie, obciążenie i ciśnienie wewnątrzdyaskowe na poziomach sąsiadujących z miejscem zespolenia. Hilibrand i wsp. (1999) przewidywali, że u 25,6% pacjentów, u których wykonano przednie zespolenie kręgosłupa szyjnego, w ciągu 10 lat od operacji wystąpi nowa objawowa choroba w sąsiednim segmencie.

Podobnie jak w badaniu Nabhan A. i wsp. (2011), autorzy Ghobrial GM. i wsp. (2019) porównują następstwa na poziomach leżących u podstaw obu technik, ale w 10-letnim badaniu prospektywnym. Naukowcy udowodnili, że w porównaniu z dysektomią przedniego odcinka szyjnego i fuzją, mniej pacjentów z artoplastyką krążka szyjnego wymagało operacji z powodu objawowego zwyrodnienia na poziomie sąsiednim, ale nie osiągnęło to istotności statystycznej. Jednak gdy dane z 2 prospektywnych, randomizowanych badań z podobnymi kryteriami włączenia i wykluczenia zostały połączone w celu zwiększenia mocy oceny, w 7-letniej obserwacji zaobserwowano istotną różnicę w objawowej operacji na sąsiednim poziomie wymagającej leczenia.

4.3 Interwencja w odcinku piersiowym i lędźwiowym

Główną przyczyną bólu dolnego odcinka kręgosłupa jest proces zwyrodnieniowy. Równocześnie jedną z głównych technik operacyjnych stosowanych w tej patologii jest fuzja kręgosłupa. Chociaż w krótkim okresie czasu wynik tej techniki jest zadowalający, to w dłuższym okresie czasu występują niekorzystne zjawiska na poziomach sąsiadujących z operowanym. Wśród pacjentów, którzy w kolejnych badaniach lekarskich wymagają dalszego leczenia operacyjnego, jedną z najczęstszych przyczyn jest objawowe zwyrodnienie sąsiedniego segmentu.

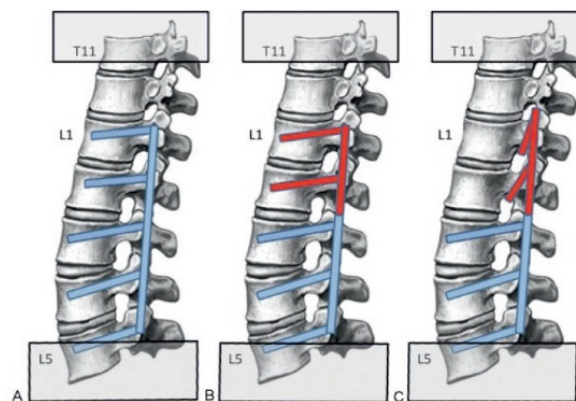
Wiadomo, że ustawienie kręgosłupa i miednicy wpływa na obciążenie kręgosłupa i jest coraz częściej dyskutowane jako związane ze zwyrodnieniem dysku, a w szczególności ze zwyrodnieniem sąsiednich segmentów. Uważa się, że nieprawidłowe zmiany w obciążeniu mechanicznym wpływają niekorzystnie na biologię komórek i tkanek międzykręgowych i mogą powodować zaburzenia strukturalne w sąsiadujących dyskach, które zapoczątkowują lub przyczyniają się do degeneracji dysków. Niedawno przeprowadzone kliniczne długoterminowe badanie wykazało, że hipolordoza lędźwiowa jest niezależnym czynnikiem ryzyka przyspieszonej progresji zwyrodnienia krążka międzykręgowego, nawet bez konieczności wykonania zespolenia.

Z drugiej strony, w zależności od poziomu zespolenia, może dojść do ograniczenia ruchomości. Informacje na ten temat przedstawiono w pracy Se Jin Choi i wsp. (2018). W pracy tej określili oni, że ROM wyprostu lędźwiowego był statystycznie zmieniony przez fuzję na poziomie L4/5 lub L5/S1, podobnie jak ROM zgięcia boczno lędźwiowego. Fuzja na poziomie L4/5 lub L5/S1 nie miała wpływu na ROM rotacji bocznej lędźwi. Wyniki te sugerują, że dolne segmenty lędźwiowe (L4/5, a zwłaszcza L5/S1) przyczyniają się do ROM kręgosłupa (wyprost i zgięcie boczne), ale same te segmenty nie odgrywają znaczącej roli w ruchach zgięcia kręgosłupa.

Podobnie jak w pracy Jin Choi i wsp. (2018), w badaniu Obid P. i wsp. (2017) określono utratę ruchomości segment po segmencie w trzech systemach instrumentacji do fuzji kręgosłupa lędźwiowego od T11 do L5. Grupami w tym badaniu były (Rysunek 13): (A) grupa sztywna:

czteropoziomowa instrumentacja sztywna; (B) grupa dynamiczna: dwupoziomowa instrumentacja sztywna (L3-L5) połączona z systemem Elaspine (Spinelab AG, Winterthur, Szwajcaria) (L1-L3); oraz (C) grupa hakowa: dwupoziomowa instrumentacja sztywna (L3-L5) połączona z hakami laminarnymi (L1-L3).

Nie udało się udowodnić hipotezy, że konstrukcje hybrydowe ograniczają ROM na poziomach instrumentowanych dynamicznie, ale umożliwiają większy zakres ruchu niż instrumentacja sztywna. Zarówno system Elaspine, jak i haki laminarne ograniczały ROM w poziomach instrumentowanych w stopniu zbliżonym do tego, jaki występuje w przypadku instrumentacji sztywnej, co skutkowało podobnym zwiększeniem ruchomości w segmentach sąsiadujących z instrumentacją. Tak więc system dynamiczny nie zapobiegnie urazom sąsiednich poziomów, które obserwuje się w zespoleniach z użyciem systemów sztywnych.



Rysunek 13 - Schematyczny przegląd przedstawiający ustawienie trzech grup badawczych z badania Obid P. i wsp. (2017). (A) Grupa R: czteropoziomowa instrumentacja sztywna; (B) grupa D: dwupoziomowa instrumentacja sztywna (L3-L5) połączona z systemem Elaspine (Spinelab AG, Winterthur, Szwajcaria) (L1-L3); oraz (C) grupa H: dwupoziomowa instrumentacja sztywna (L3-L5) połączona z hakami laminarnymi (L1-L3).

5. Kluczowe zagadnienia

- Istnieją różne rodzaje urazów kręgosłupa szyjnego w zależności od kierunku i wielkości siły działającej na kręgosłup: zgięcie, wyprost, kompresja, dystrakcja, rotacja.
- Urazy górnego odcinka kręgosłupa szyjnego często prowadzą do śmierci (około 40%), a rodzaj urazu może spowodować uszkodzenie ważnych obszarów ośrodkowego układu nerwowego. Do najczęściej wymienianych urazów w literaturze należą: złamania kłykci kości potylicznej, zwichnięcie atlantowo-potyliczne, złamania atlasu, zwichnięcie atlanto-osiove i złamania osi..
- Urazy dolnego odcinka kręgosłupa szyjnego reprezentują szeroki wachlarz urazów i stopni niestabilności, z których najczęstsze są: złamania typu Burst, złamania typu spadającej łzy, złamania łuku śródstrzałkowego, przerwanie stawów międzykręgowych, złamanie wyrostka kolczystego i smgnięcie biczem.
- Duża różnica między kręgosłupem szyjnym a odcinkiem piersiowym i lędźwiowym polega na tym, że ten ostatni ma sztywność, której nie ma kręgosłup szyjny, więc mechanizmy urazów są między nimi bardzo różne.
- W odcinku piersiowym i lędźwiowym do najczęstszych urazów należą: złamania płytki czołowej, pęknięcia typu Burst, złamania klinowe i urazy spowodowane pasami bezpieczeństwa typowe dla połączenia piersiowo-lędźwiowego.
- Leczenie urazów kręgosłupa może być zachowawcze lub operacyjne, w zależności od ciężkości urazu i stabilności uszkodzonego odcinka kręgosłupa. Różne decyzje medyczne mogą mieć istotny wpływ na funkcjonalność, ponieważ będą powodować biomechaniczne zmiany w funkcjonowaniu kręgów w celu naprawy lub stabilizacji uszkodzenia.
- W górnym odcinku kręgosłupa szyjnego techniki unieruchomienia mogą ograniczyć ruchomość szyjną do 40% całkowitego zgięcia-wyprostu szyjnego, a jeśli dotyczy to odcinka potylicznego-C1 i C2, ograniczenie może osiągnąć 60% całkowitej rotacji szyjnej i 10% całkowitego zgięcia boczego.
- W dolnym odcinku kręgosłupa szyjnego, poważniejsze interwencje, takie jak fuzja, niosą ze sobą schorzenia sąsiednich segmentów, wywołując naprężenia, obciążenia i ciśnienie śróddyskowe na poziomach sąsiadujących z miejscem fuzji.
- W odcinku piersiowym i lędźwiowym kręgosłupa poważniejsze interwencje również ograniczają ruchomość, stanowiąc krytyczne miejsca zespolenia dla utraty funkcji T11-L5, L4-L5 i L5-S1.

6. Bibliografia

- [1]. Anderson P.A., and P.X. Montesano. Morphology and Treatment of Occipital Condyle Fractures. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1988 Jul; 13(7):731-6.
- [2]. Altay M., Ozkurt B., Aktekin CN., Ozturk AM., Dogan O., Tabak A.Y. Treatment of unstable thoracolumbar junction burst fractures with short- or long-segment posterior fixation in magerl type a fractures. *Eur Spine J*. 2007 Aug; 16(8): 1145–1155.
- [3]. Ashafai NS., Visocchi M., Wasik N. Occipitocervical Fusion: an updated review. *Acta Neurochir Suppl* 2019;125:247-252.
- [4]. Bensch FV, Koivikko MP, Kiuru MJ, Koskinen SK. The incidence and distribution of burst fractures. *Emerg Radiol*. 2006;12:124–9.
- [5]. Boughton OR, Bernard J, Szarko M (2015). Odontoid process fractures: the role of the ligaments in maintaining stability. A biomechanical, cadaveric study. *SICOT J*. 1: 11.
- [6]. Cahueque M., Cobar A., Zuñiga C., Caldera G. Management of burst fractures in the thoracolumbar spine. *Journal of Orthopaedics* 13 (2016) 278–281.
- [7]. Christiansen BA., Bouxsein ML. Biomechanics of Vertebral Fractures and the Vertebral Fracture Cascade. *Curr Osteoporos Rep* (2010) 8:198–204.
- [8]. Comín M., Prat J., Soler-G C. et al. (1995) *Biomecánica del Raquis y Sistemas reparación*. 1º Edición, Instituto de Biomecánica de Valencia, España.
- [9]. Curry WH., Pintar F.A., Doan N.B, Nguyen H.S., Eckardt G., Baisden J.L., Maiman D.J., Paskoff G.R., Shender B.S., Stemper B.D. Lumbar spine endplate fractures: Biomechanical evaluation and clinical considerations through experimental induction of injury. *J Orthop Res*. 2016 Jun;34(6):1084-91.
- [10]. Cusick J.F. and Yoganandan N. Biomechanics of the cervical spine 4: Major Injuries. *Clinical Biomechanics Vol 17, Issue 1 January 2002, Pages 1-20*.
- [11]. Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine*. 1983;8:817–31.
- [12]. Dickman C.A., Greene K.A., Sonntag V.K. Injuries Involving the transverse atlantal ligament: Classification and treatment guidelines based upon experience with 39 injuries. *Neurosurgery* 1996 Jan; 38(1):44-50.
- [13]. Dowdell J., Kim J., Overley S., Hecht A. Biomechanics and common mechanisms of injury of the cervical spine. *Hand Clin Neurol* 2018;158:337-344.
- [14]. Ghobrial GM., Lavelle W.F., Florman J.E., Riew K.D., Levi A.D. Symptomatic adjacent level disease requiring surgery: analysis of 10-year results from a prospective randomized, clinical trial comparing cervical disc arthroplasty to anterior cervical fusion. *Neurosurgery* 2019 Feb 1;84(2):347-354.
- [15]. González-Montané J.L. What can CT and MRI add to the assessment of symptomatic vertebral compression fracture in osteoporotic patients? From Congress ECR 2014, Number of poster C-0960. DOI: 10.1594/ecr2014/C-0960.
- [16]. Hall GC., Kinsman MJ., Nazar RG., Hruska RT., Mansfield KJ., Boakye M., Rahme R. Atlanto-occipital dislocation. *World J Orthop*. 2015 Mar 18;6(2):236-43.
- [17]. Heary R.F., Sanjeev K. Decision-making in burst fractures of the thoracolumbar and lumbar spine. *Indian J Orthop*. 2007 Oct-Dec; 41 (4): 268-276.
- [18]. Hilibrand A.S., Carlson G.D., Palumbo M.A., Jones P.K., Bohlman H.H. Radiculopathy and myelopathy at segments adjacent to the site of a previous anterior cervical arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am*. 1999 Apr;81(4):519-28.

- [19]. Izeki M., Neo M., Takemoto M., Fujibayashi S., Ito H., Nagal K., Matsuda S. The O-C2 angle established at occipito-cervical fusion dictates the patient's destiny in terms of postoperative dyspnea and/or dysphagia. *Eur Spine J* (2014) 23:328-336.
- [20]. Kaneoka K, Ono K, Inami S, et al. The human cervical spine motion during rear impact collisions: a proposed cervical facet injury mechanism during whiplash trauma. *J Whipl Relat Disord* 2002; 1(1): 85-97.
- [21]. Lei Li, Wen-Fei Liu, Hong-Kun Jiang, Yun-Peng Li. Biomechanical evaluation of four different posterior screw and rod fixation techniques for the treatment of the odontoid fractures. *Int J Clin Exp Med*. 2015;8(6):8571-8580.
- [22]. Luan F, Yang KH, Deng B, et al. Qualitative analysis of neck kinematics during low-speed rear-end impact. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2000;15(9):649-657.
- [23]. Martín-Ferrer S. High cervical spine injuries: classification, therapeutic indications, and surgical approaches: 286 consecutive cases. *Neurocirugia (Astur)*. 2006 Oct;17(5):391-419.
- [24]. Miyata M., Neo M., Fujibayashi S., Ito H. Takemoto M., Nakamura T. O-C2 angle as a predictor of dyspnea and/or dysphagia after occipitocervical fusion. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2009 Jan 15;34(2):184-8.
- [25]. Nichols J1, West JS. Traumatic atlantooccipital dislocation injury in children. *AORN J*. 1994 Oct;60(4):544-6, 548-9, 551-4 passim.
- [26]. Nabhan A., Ishak B., Steudel W.L., Ramadhan S., Steimer O. Assessment of adjacent-segment mobility after cervical disc replacement versus fusion: RCT with 1 year's results. *Eur Spine J* (2011) 20:934-941.
- [27]. Nightingale, R, Myers, BS, and Yoganandan, N, Biomechanical Aspects of Cervical Spine Trauma, in *Accidental Injury: Biomechanics and Prevention*, N. Yoganandan, A. Naham, and J.W. Melvin, Editors. 2014, Springer: New York, NY.
- [28]. Obid P., Danyali R., Kueny R., Huber G., Reichl M., Richter A., Niemeyer T., Morlock M., Püschel K., Übeyli H. Hybrid Instrumentation in Lumbar Spinal Fusion: A Biomechanical Evaluation of three different instrumentation techniques. *Global Spine J*. 2017 Feb;7(1):47-53.
- [29]. Pertersilge CA., Emery SE. Thoracolumbar burst fracture: Evaluating stability. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI Volume 17, Issue 2, April 1996, Pages 105-113*.
- [30]. Pryputniewicz D.M. and Hadley M.N. Axis Fractures. *Neurosurgery* 2010 Mar;66(3 Suppl):68-82.
- [31]. Rihn JA, Fisher C, Harrop J et al. (2010). Assessment of the posterior ligamentous complex following acute cervical spine trauma. *J Bone Joint Surg Am*. 92: 583–589.
- [32]. Ryba L., Cienciala J., Chaloupka R., Repko M., Vyskocil R. Injury of Upper Cervical Spine. *Soud. Lek* 2016;61(2):20-5.
- [33]. Se Jin Choi, Ji Won Moon, Dalsung Ryu, Chang Hyun Oh, Seung Hwan Yoon. Range of Motion According to the fusion level after lumbar spine fusion: A retrospective study. *Nerve*. 2018;4(2):55-59.
- [34]. Spitzer WO, Skovron ML, Salmi LR, et al. Scientific mono-graph of the Quebec Task Force on Whiplash-Associated Disorders: redefining "whiplash" and its management. *Spine* 1995; 20(8Suppl): 1S-73S.
- [35]. Torreti J.A. and Sengupta D.K. Cervical Spine Trauma. *Indian J Orthop* 2007 Oct;41(4):255-67.
- [36]. Traynelis, V.C., Marano, G.D., Dunker, R.O., Kaufman, H.H.: Traumatic atlanto-occipital dislocation: Case report. *J Neurosurg* 1986; 65: 863-870.

- [37]. Tuli S., Charles H.T., Fehlings M.G., Mackay M. Occipital Condyle Fractures. *Neurosurgery*, Volume 41, Issue 2, August 1997, Pages 368–377.
- [38]. Waseem M., Upadhyay R., Al-Husayni H., and Agyare S. Occipital condyle fracture in a patient with neck pain. *Int J Emerg Med*. 2014; 7:5.
- [39]. Wenning KE. and Hoffmann M.F. Does isolated atlantoaxial fusion result in better clinical outcome compared to occipitocervical fusion? *Journal of Orthoedic Surgery and Research* (2020) 15:8.
- [40]. Yang S.Y., Boniello A.J., Poorman C.E., Chang A.L., Wang S., Passias P.G. A review of the diagnosis and treatment of atlantoaxial dislocations. *Global Spine J*. 2014 Aug; 4(3): 197–210.
- [41]. Yu WY, Siu CM. Seat belt injuries of the lumbar spine--stable or unstable? *Paraplegia*. 1989 Dec;27(6):450-6.



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.