

BIOMEHANIKA KIČME

Osnovna funkcija kičmenog stuba je da nosi glavu i trup u različitim pozicijama, održavajući pri tome dovoljnu fleksibilnost i protektirajući kičmenu moždinu od povreda. Svakodnevne aktivnosti zahtevaju raznovrsnu pokretljivost kičme. Pokreti se moraju vršiti s ekstremnom stabilnošću, jer svaka dislokacija pršljenova može biti opasna. Zato su pokreti strogo kontrolisani jedinstvenom interakcijom diskoligamentarnih struktura s jedne strane, i aktivnom mišićnom kontrakcijom, s druge strane¹.

Pokreti među pršljenima se odvijaju preko složenog zglobnog mehanizma kojeg je Junghans (1950)² nazvao „Bewengungssegment“ (segmentum mobilis), a za koji se kod nas odomaćio izraz „dinamički vertebralni segment“³. Dinamički vertebralni segment (DVS) je osnovna funkcionalna jedinica kičmenog stuba koja obuhvata sva meka tkiva koja međusobno spajaju dva susedna pršljena: intervertebralni diskus, posterolateralne apofizne artikulacije, zglobne kapsule i ligamente. Svaka od ovih struktura učestvuje u dinamici vertebralnih pokreta na specifičan način. Dok intervertebralni diskus omogućava pokrete, male artikulacije određuju njihov smer.

U neutralnoj poziciji kičmenog stuba nukleus pulpozus je smešten u centralnom delu intervertebralnog prostora gde deluje u vidu stisnute elastične opruge koja ima tendenciju razdvajanja tela pršljenova. Kao protivteža ovoj sili suprotstavljaju se anulus fibrozus, kompletan ligamentarni aparat i paravertebralna muskulatura. Tako se čitav niz pokretnih elastičnih elemenata postavlja u stalnu međusobnu ravnotežu koja osigurava centričan i stabilan položaj svakog pršljena⁴. Ako se na određeni segment kičmenog stuba aplikuje asimetrično opterećenje, on se savija u pravcu dejstva sile. Savijanje simultano elangira ligamentarne strukture na konveksnoj strani krivine. Intervertebralni prostor postane klinastog oblika. Nastale promene nadražae elastične strukture DVS-a, koji automatski reaguje u težnji da ponovo uspostavi poremećenu ravnotežu. Intervertebralni disk se, pri tome, adaptivno preformiše. Nukleus pulpozus putuje na mesto manjeg opterećenja gde se, poput nekog elastičnog jastučeta, umetne u prošireni deo intervertebralnog prostora vršeći snažan pritisak u kraniokaudalnom pravcu. Tom pritisku odupiru se opozitne i jednake sile odgovarajućeg dela anulusa i ligamentarnog aparata, kako bi sprečile istiskivanje nukleusa sa novog mesta. Na taj način, međusobnim delovanjem svih struktura koje ulaze u sastav DVS-a, omogućava se balansirana i amuskularna fiksacija pršljenova u svakom novom položaju⁵⁻¹⁰. Mišićni sistem, posebno njegov

ekstenzorni deo, deluje, pri tome, kao sekundarni stabilizirajući faktor i faktor koji smanjuje dejstvo tenzionih sila na konveksnoj strani savijenog dela kičmenog stuba¹.

Osnovni pokreti pršljenova odvijaju se preko tri različita mehanizma koji uključuju translaciju, angulaciju i rotaciju. Mehanizam translacije vrši se onda kada jedan pršljen klizi preko drugog, što se primarno viđa u sagitalnoj ravni i obuhvata prednje i zadnje pomeranje tokom pokreta. S druge strane, mehanizam angulacije se odigrava i u sagitalnoj i u frontalnoj ravni. U toku fleksije-ekstenzije i lateralne fleksije, telo pršljena ima tendenciju nagibanja u pravcu depasmana. Rotacija se vrši oko vertikalne osovine između dva pršljena¹¹. Kombinacijom mehanizma translacije, angulacije i rotacije nastaje mogućnost vršenja niza pokreta u prostoru, što se može posmatrati trodimenzionalno i matematički izraziti stepenima slobode kretanja¹²⁻¹⁴. Pokreti se mogu odvijati u sagitalnoj, frontalnoj i horizontalnoj ravni oko tri osovine: Y (vertikalna), X i Z (horizontalne). U praktičnom smislu svaki pršljen može da se pomera napred-nazad, gore-dole i u stranu, uz mogućnost rotiranja oko navedenih osovina (fig. 3.1).

NORMALNI POKRETI KIČME

Gornja vratna kičma predstavlja tranzitnu zonu između lobanje i ostalog dela kičmenog stuba, što značajno komplikuje kinematiku ove regije. U predelu C₁-C₂

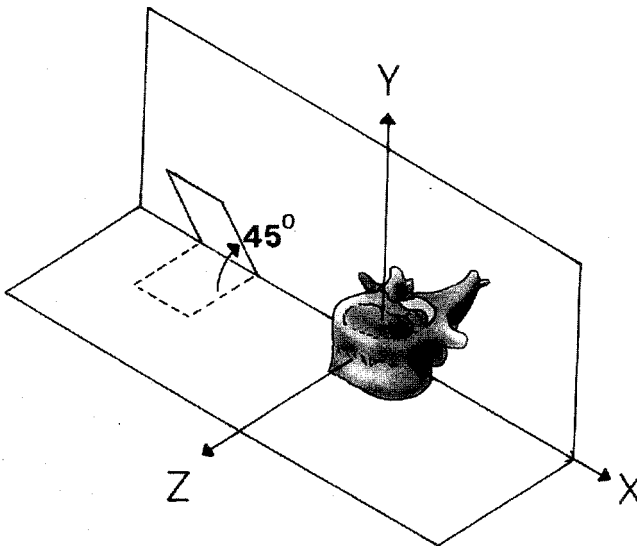


Fig. 3.1 Ravni i osovine oko kojih se izvode pokreti kičme

postoji širok obim pokreta koji se mogu odvijati neovisno od pokreta niže ležećih nivoa. Razlog za takvu mobilnost je prisustvo zglobova, a ne dinamičkih vertebralnih segmenata¹⁰. Atlanto-okcipitalne artikulacije, zbog svog karakterističnog izgleda i različitog radiusa okcipitalnih kondila, vrše pokrete slične zglobu kolena u smislu fleksije i ekstenzije¹⁵. Atlantoaksijalni zglobovi omogućavaju, osim minimalne fleksije, još i rotaciju, vertikalnu aproksimaciju (teleskopski tip pokreta) i lateralno klizanje. Zajedno u atlanto-okcipitalnim i atlanto-aksijalnim zglobovima odigrava se po 15° fleksije i ekstenzije vrata. Prednji koštani luk atlasa zadržava stabilne i neizmenje odnose sa zubom aksisa dok ovaj klizi cefalno ili kaudalno. Razmak između ova dva elementa u normalnim stanjima ne prelazi 2–3 mm^{16,17}. Zub aksisa s prednjim lukom atlasa i transversalnim ligamentom pravi stožerasti zglob oko kojeg se vrši 47° aksijalne rotacije glave, a čini 50% od ukupne rotacije koju vrat može da izvede¹⁶. Tokom pokreta rotacije nastaje i pokret vertikalne aproksimacije koja vidljivo snižava kombinovane visine atlasa i aksisa. Ovako složena pokretljivost dužna je bikonveksnim zglobnim fasetama; najniže tačke kontakta svake fasete su pri maksimalnoj rotaciji glave, dok u neutralnoj poziciji postoji kontakt u najvišjim tačkama. Bočno klizanje je kompleksan pokret koji nastaje kod lateralne fleksije vrata i moguć je samo ako je već prisutno 10–15° atlantoaksijalne rotacije. Rotacija je neophodna da olabavi kapsularne ligamente zglobova, što je uslov da započne njihovo lateralno klizanje¹⁸. Kod bočnog klizanja C₁ na C₂ pršljenu dens izgleda asimetrično postavljen između lateralnih masa atlasa, međuzglobni prostor sužen, a gornja faseta pomeren za 2–4 mm na stranu pokreta²⁰. Ako je lateralna fleksija veća od 30°, spinozni nastavak aksisa pravi devijaciju u suprotnom pravcu indikujući da se odigrao veći stepen rotacije¹². U predelu donje vratne kičme pokreti su složenog mehanizma, međusobno zavisni i podvrgnuti biomehanici dinamičkog vertebralnog segmenta¹⁰. Primarni pokreti ove regije su fleksija, ekstenzija, lateralna fleksija i rotacija. Fleksija i ekstenzija su elementarni pokreti između dva pršljena i vrše se u sagitalnoj ravni oko horizontalne osovine. Specifični položaj i orijentacija artikularnih nastavaka omogućavaju određeni obim prednjeg klizanja jednog pršljena na drugom u fleksiji i zadnjeg klizanja u ekstenziji. Tokom fleksije gornji pršljen se pomera napred, prednji deo tela mu se približava kaudalnom susedu (konvergencija), a pršljenski lukovi i artikularni nastavci se udaljavaju (divergencija). Pri tome intervertebralni diskusi se prošire posteriorno, a suze anteriorno. Zadnji ligamentarni kompleks se isteže do određene granice koja limitira dalju fleksiju¹⁹. Buoncore i sar. (1966)²⁰ su cineradiografskim studijama pokazali da se spinozni nastavci tokom fleksije separišu progresivno u vidu lepeze, a Fielding(1964)¹⁸ je pomoću iste tehnike notirao da takav gradualni intersegmentni tok pokreta ima najveću amplitudu u predelu gornje vratne kičme. Prvo se okciput separiše od zadnjeg luka atlasa, a potom ovaj od spinozusa aksisa. Dalje sledi ritmično razdvajanje niže ležećih spinoznih nastavaka. Ekstenzija produkuje obrnute efekte. Da bi do kraja objasnili mehanizme fleksije-ekstenzije, klasični autori Exner(1954)²¹, Hjorstjo (1959)²² i Fielding (1964)¹⁸, ponudili su koncept da se ovi pokreti vrše oko transversalne osovine koja prolazi kroz centar nukleus pulpozusa. Obično trasiranje dinamičkih rentgenograma dovoljno je da ilustruje pogrešnu postavku ove hipoteze.

Ako se pretpostavi da se sagitalni pokreti između dva pršljena odvijaju prednje-zadnjom translacijom, tada bi normalna inklinacija artikularnih nastavaka tokom pokreta vodila prekomernim i neizvedivim varijacijama visine intervertebralnog diska. S druge strane, kada bi se pokreti pršljena izvodili preko gornje površine nukleus pulpozusa, koaptacija artikularnih nastavaka bi prevazišla svoje fiziološke limite. Po Louis-u (1983)²³ jedino pravo objašnjenje je da je pomeranje pršljenova u fleksiji-ekstenziji cirkularni pokret oko transverzalne osovine koja nije smeštena u visini nukleusa nego ispod njega u predelu susednog donjeg tela pršljena. Pokreti gornjeg pršljena opisuju jedan krug s lučnim klizanjem artikularnih faseta i pendularnim deplasmanom diska oko istog geometrijskog centra. Ovakav stav potpuno odgovara starim observacijama Fick-a (1911)²⁴ i Strasser-a (1913)²⁵, koji su prvi opisali rotaciju jednog pršljena preko drugog. Niemyer i Penning (1963)²⁶, Penning (1968)²⁷ i Lysell (1969)²⁸, pokazali su da je s biomehaničke tačke gledišta moguće kalkulisati trenutne centre oko kojih se vrše pokreti translacije i angulacije između dva pršljena u sagitalnoj ravni. Tokom fleksije i ekstenzije pršljen klizi i nagiba se preko intervertebralnog diska po određenom luku pokreta čija osovina polazi od trenutnog centra rotacije smeštenog unutar tela susednog donjeg pršljena. Karakteristično, svaki niži trenutni centar rotacije ima tendenciju da zauzme poziciju više anteriorno i superiorno u odnosu na isti centar susednog višljeg pršljena. Tako npr., trenutni centar oko kojeg se rotira C₂ pršljen, lociran je u posteriornom delu tela C₃, a za C₆ pršljen, u visini gornjeg kortikalnog platoa i ispred C₇. Važnost ove činjenice je u tome što se, u zavisnosti od lokacije ovog centra, može odrediti dominantni pokret posmatranog pršljena. Naime, ako je trenutni centar u okviru pršljena, dominantni pokret je angulacija, a ako je izvan pršljena, onda je to pokret translacije. To pomaže da se shvati zašto C₂ pršljen teži ka translaciji, a C₆ ka angulaciji¹². Normalna pokretljivost pojedinačnih cervikalnih intervertebralnih prostora, predmet je mnogih istraživanja^{18,33,11}. Po Jakson-u (1966)²⁹, najveći stres i istezanje odigravaju se u predelu C₄-C₅ artikulacija tokom hiperekstenzije i u C₅-C₆ intervertebralnom prostoru tokom fleksije. Jones (1960)³⁰ je izneo identično mišljenje da su pokreti između C₄ i C₅ pršljenova, uključujući i disk između C₅ i C₆, veći nego u drugim predelima cervikalne kičme. Kottke i Mundale (1959)³¹ su na cineradiografijama zabeležili najveći stepen fleksije-ekstenzije u C₅-C₆ nivou, sa skoro isto toliko pokreta u C₄-C₅ i C₆-C₇ nivoima. Bhalla i Simmons (1969)³² su observirali maksimalnu fleksionu i ekstenzionu pokretljivost u visini C₄-C₅ i najmanju u visini C₇-Th₁. Po istim autorima segment C₅-C₆ je najvulnerabilniji iz razloga ograničenog opsega pokreta ekstenzije u hiperekstenzionih povreda vratne kičme. Kod fleksionih povreda najčešće stradaju C₆-C₇ i C₇-Th₁ jer su u tim nivoima pokreti fleksije manjeg opsega od pokreta ekstenzije. Opseg ekscurzije tela pršljena u anteroposteriornom pravcu zavisi od fleksibilnosti diskusa, oblika i inklinacije faseta, laksiteta ligamenata, integriteta kapsularnih struktura, starosti pacijenta i nivoa koji se razmatra³³⁻³⁵. Stepem pomeranja tela pršljena veći je u dece mlađe od 10 godina³⁶. Kod odraslih osoba veličina deplasmana jednog pršljena na drugom raste progresivno idući od C₂ ka C₆ nivou. Povećana mobilnost srednjih i donjih cervikalnih segmenata (C₄-C₇) objašnjava se izgledom i oblikom intervertebralnih

diskusa koji su u tim nivoima tanji, klinastog oblika i s prednjom visinom većom od zadnje. Kada započne fleksija ili ekstenzija, između pršljenova se odigra pokret klizanja, a nukleus pulposus se deplasira nazad, odnosno napred. To omogućava dodatno nagibanje i dalje povećanje ukupne pokretljivosti¹². Normalno se fleksija-ekstenzija u predelu cervikalne kičme odvija u ukupnom obimu od 100–117°³⁷. Egzaktne mere sagitalnih pokreta pojedinih cervikalnih intervertebralnih prostora dao je De Seze (1951)³⁸ sa sledećim obimom fleksije-ekstenzije: okciput-atlas 15°; C₁–C₂, 15°; C₂–C₃, 15°; C₃–C₄, 15°; C₄–C₅, 19°; C₅–C₆, 17.5°; C₆–C₇, 17.5° (ukupno 114°).

Rotacija i lateralna fleksija vratne kičme izvode se oko vertikalne, odnosno sagitalne osovine. Geometrijski centar lateralne fleksije (inklinacije) smešten je na sredini između leve i desne artikularne fasete. Centri rotacije pak variraju u zavisnosti od nivoa i ne opisuju jedan luk kruga, već pre segment elipse²⁴. Tokom lateralne fleksije donji artikularni nastavci s konkavne strane krivine klize ka dole i nazad, dok oni s konveksne strane krivine klize ka gore i napred. To neminovno produkuje lateralnu fleksiju udruženu s rotacijom i obrnuto. Međusobna zavisnost ova dva pokreta dužna je obliku i inklinaciji artikularnih nastavaka¹⁶. Esencijelno se sva lateralna fleksija odigrava između C₂ i C₇ pršljenova²⁰ i normalno iznosi 100–120°³⁷. Na suprot, u donjih pet cervikalnih intervertebralnih prostora odvija se samo 50% od ukupno moguće rotacije vrata (Hohl, 1964)¹⁹, čiji su normalni parametri 80–143,7°³⁷. Tokom udruženih pokreta lateralne fleksije, rotacije i prednje fleksije, intervertebralni diskus se maksimalno deformiše, što je od značaja u patologiji traumatizma cervikalne kičme¹⁸.

Što se tiče normalne pokretljivosti **torakolumbalne kičme**, najznačajniji pokret tokom dnevnih aktivnosti je, kao i kod donje vratne kičme, fleksija. Da bi se ona izvela, potrebno je da dođe do simultane prednje kompresije intervertebralnog diska i pokreta artikularnih fasete. Donji set fasete se pomera gore i napred preko opozitnog gornjeg seta susednog donjeg pršljena. Taj pokret ograničavaju zadnji ligamenti i dorzalna muskulatura. Ekstenzija je mnogo suptilniji pokret, sa zadnjom kompresijom diska i pokretima artikularnih nastavaka. Pri tome, donji artikularni nastavci klize ka nazad i dole preko gornjeg seta donjeg pršljena. Pokret oponira prednji longitudinalni ligament i ventralni mišići. Da bi se izvela lateralna fleksija, mora biti udružena i rotacija; pri tome dolazi do klizajuće separacije diartroze na konveksnoj strani i njenog sužavanje na konkavnoj strani. Prednja površina tela pršljena se, istovremeno, kreće ka fleksionom konveksitetu, a spinozni nastavci ka konkavitetu. Lateralnu fleksiju ograničavaju intertransverzalni ligamenti i rebra. Mobilnost grudne kičme nije uniformna celom dužinom. Intersegmentarna mobilnost u sagitalnoj ravni iznosi, na osnovu eksperimentalnih istraživanja Bonnela i Morela (1988)³⁹, od 2 do 6°. Rebra sa svojim pripojima na izvestan način ograničavaju pokrete. Fleksija i ekstenzija se povećavaju po obimu u predelu donje torakalne regije gde su intervertebralni diskusi i tela pršljenova masivniji, a rebra gube limitirajuću funkciju. Totalna fleksija u predelu grudne kičme iznosi 30°, a totalna ekstenzija 20°; respektivne vrednosti za lumbalnu kičmu su 53° i 30°²⁴. Rotacija je najmanje ograničena artikularnim nastavcima⁴⁰. Ako centar rotacije pada

unutar ili ispred intervertebralnog diska, moguće je izvođenje značajnog opsega ovog pokreta. Suprotna situacija je kod lumbalnih pršljenova čiji su artikularni nastavci postavljeni više u sagitalnoj ravni, pa im centar rotacije leži iza diska. To ograničava ukupnu veličinu aksijalne rotacije. U stojećem položaju i sa fiksiranom karlicom, normalno se izvodi 74° rotacije između prvog i dvanaestog grudnog pršljena. Aksijalna rotacija lumbalne kičme je mnogo manja i iznosi 16°, a razlog ograničenja je u poziciji faseta sinovijalnih zglobova koje se pružaju od ventromedijalno ka dorzolateralno. Artikulacije lumbalne regije, nasuprot, dozvoljavaju slobodnu fleksiju, ekstenziju i lateralnu fleksiju. Treba znati da lokacija pršljena u odnosu na centar graviteta direktno utiče na obim pokreta i stabilnost kičme. Normalna torakalna kifoza postavlja pršljene te regije iza centra gravitacije. U lumbalnoj kičmi fiziološka lordoza postavlja srednje lumbalne pršljene ispred centra gravitacije. Na taj način postoje tranzitorni pršljeni između dve regije gde se presecaju centri gravitacije i to je između Th₁₀ i L₂. Zbog toga je torakolumbalni prelaz najnestabilniji deo kičme. Slično važi i za lumbosakralne zglobove jer lumbosakralni vertebralni ugao pravi veliku promenu pravca kičmenog stuba pa centar gravitacije prolazi kroz prednji deo petog lumbalnog pršljena. Rezultat je značajno povećanje sila smicanja s tendencijom petog lumbalnog intervertebralnog diska da isklizne, a tela istoimenog pršljena da ide u antelistezu²⁴.

PATOLOŠKI POKRETI

Prisustvo različitih kongenitalnih i akviriranih stanja može stvarati abnormalne pokrete kičmenog stuba. U tzv. cervikalne asimilacije, kada su okciput i atlas nediferencirani na rođenju, vremenom ekscesivna mobilnost između fiksiranog kraka poluge okciput-atlas i aksisa može dati progresivni akvirirani laksitet transverzalnog ligamenta⁴¹. Kod Klippel-Feil sindroma prekomerni cervikalni pokreti često proističu u asocijaciji s abnormalnim tipovima interspinoznog kompleksa distalno od deformiteta. Takođe, moguća je i udružena atlantoaksijalna hiperobilnost⁴². Sličan opseg pozne nestabilnosti notiran je iznad i ispod mesta spondilodeze¹⁸. Epifizne varijacije, jedinstvena vertebralna arhitektura, inkompletna osifikacija i hiperobilnost kičme kod dece mogu izazvati nesigurnost u interpretaciji rentgenograma posle istorije traume, lokalne bolnosti i ukočenosti; tako se neke normalne varijacije mogu prikazati kao aktuelne povrede⁴³⁻⁴⁶. Odsustvo lordoze cervikalne kičme može biti normalan nalaz kod dece i odraslih i nije neophodan indikator traume^{47,48}. Kod dečjih cervikalnih kičmi nekada se vidi gubitak uniformne angulacije intervertebralnih prostora kada je vrat u poziciji hiperfleksije⁴⁶. Cattell i Filtzer (1965)⁴⁹ su pokazali i druge anatomske varijacije koje mogu biti normalne kod dece stare između 1 i 7 godina. To su pseudosubluksacije C₂-C₃ nivoa koju je već ranije opisao Bailey (1964)⁵⁰, povećanje razmaka između densa i prednjeg luka atlasa preko normalnih 2-3 mm⁵¹ i preklapanje prednjeg luka atlasa i densa u hiperekstenziji cervikalne kičme. Hiperobilnost notirana kod navedenih stanja izraz je laksiteta ligamenata⁵¹, klinastog oblika tela pršljenova⁵², relativno horizontalne inklinacije artikularnih nastavaka gornjeg dela cervikalne kičme⁵² i inkompletne osifikacije densa aksisa i/ili prednjeg luka atlasa^{51,52}. Shodno mišljenju pomenutih

autora, navedena stanja su prolazna u dece, dok su kod odraslih osoba uvek znak patoloških promena. Po Louis-u (1983)²⁴, nestabilnost cervikalne kičme uvek je prisutna ako se prekorači fiziološki prednji depasman od 3,5 mm za C₁-C₃ segmente i 2 mm za C₄-C₇ segmente. White i sar. (1975)⁵³ definisali su svako anteroposteriorno pomeranje veće od 3,5 mm i svaku angulaciju između dva susedna pršljena veću od 11°, mereno na klasičnim ili fleksiono-ekstenzionim profilnim radiografijama, kao znak hiperobilnosti i nestabilnosti vratne kičme. Kod velikih dislokacija i fraktura-dislokacija, ovi znaci su uvek prisutni i jasno vidljivi. Granična pomeranja, koja se teže otkrivaju, često su izraz degenerativnih promena⁵⁴. Ista se mogu zapaziti i kod fasetnih subluksacija i fraktura artikularnih masiva sa minimalnom prednjom translacijom⁵⁵. Jednako, ozbiljne povrede ligamenata i artikularnih kapsula ponekad omogućavaju intermitentnu subluksaciju tela pršljena koja nije laka za dijagnozu⁵⁶.

S obzirom na anatomske karakteristike i klinička nestabilnost torakolumbalne kičme ima svoje specifičnosti. Prema Panjabi i sar. (1981)⁵⁷, torakalna kičma je nestabilna ako je, na fleksiono-ekstenzionim radiogramima, relativna translacija između dva susedna pršljena u sagitalnoj ravni veća od 2,5 mm i relativna rotacija (angulacija) veća od 5°. Za lumbalnu kičmu se smatra da je nestabilan nivo gde postoji više od 9° angulacije u fleksiji⁵⁸. Kod nekih urođenih ili stečenih stanja torakolumbalne kičme može se naći angularni deformitet koji imitira postraumatske lezije. To su, pre svega, kongenitalna kifoza, Scheurmann-ova bolest, lateralna hemivertebra, spondiloepifizarna displazija i spondilolisteza^{44,59}. Dobro uzetom anamnezom i preciznim radiološkim studijama, mogu se izbeći moguće diferencijalno-dijagnostičke zamke i postaviti pravilna konačna dijagnoza.

LITERATURA

1. Radin, E.L., Simon, S.R., Rose, R.M. and Paul, I.L.: Practical biomechanics for orthopaedic surgeon. Publ. John Wiley and Sons, New York-Chichester-Brisbane-Toronto, 1979.
2. Junghans, H. (1950): In Schmorl, G. and Junghans, H.: The human spine in health and disease. New York, Grune and Stratton, 1971.
3. Durrigl, P. i Durrigl, T.: Degenerativne afekcije dinamičkog vertebralnog segmenta. Podela i nazivi. Reumatizam, XIV, 5:165-168, 1967.
4. Schmorl, G. and Junghans, H.: Die gesunde und die kranke wirbelsäule in Röntgebild Klinik. Fifth ed. Stuttgart Georg Thieme, 1968.
5. Horton, W.G.: Further observations on the elastic mechanism of the intervertebral disc, J. Bone Joint Surg., 40-B:552, 1958.
6. Morris, J.M., Lucas, D.B., Bresler, B.: Role of the trunk in stability of the spine. J. Bone Joint Surg., 43-A: 327-335, 1961.
7. Nachemson, A.: The influence of spinal movements on the lumbar intradiscal pressure and on the tensile stresses in the annulus fibrosus. Acta Orthop. Scand., 33:133-207, 1963.
8. Okusima, H.: Study on hydrodynamic pressure of lumbar intervertebral disc. Arch. Chir., 39/1:1-45, 1970.

9. Kovačić, S., Durrigl, P., Jajić, I.: *U Ruskowski i sar.: Ortopedija*, Jumena, Zagreb, 1979.
10. Kummer, B.: *Biomechanik der wirbelgelenke. Die wirbersaule in Forsch, Praxis*, 87:1797–1799, 1981.
11. Heppenstall, R.B.: *Fracture treatment and healing*. W.B. Saunders Co, Philadelphia-London-Toronto, 292–355, 1980.
12. Schultz, A.B. and Galante, J.O.: *Mathematical model for the study of the mechanics of the human vertebral column*. *J. Biomech.*, 3:405–416, 1970.
13. Hindmarsh, J., Larsson, J. and Matisson, O.: *Analysis of changes in the scoliotic spine using a three-dimensional radiographic technique*. *J. Biomech.*, 13:279–290, 1980.
14. Panjabi, M. and White, A.A.: *A mathematical approach for three-dimensional analysis of mechanics of the spine*. *J. Biomech.*, 16:785–795, 1983.
15. White, A.A. and Panjabi, M.M.: *The clinical biomechanics of the spine*. J.B. Lippincott Co. Philadelphia, P.A., 1978.
16. Mc Keever, F.M.: *Atlantoaxial instability*. *Surg. Clin. N. Am.*, 48:1375–1390, 1968.
17. Fielding, J.W., Cochran, G.U.B.: *Lansing, J.E., Hohl, M.: Tears of the transverse ligament of the atlas*. *J. Bone Joint Surg.*, 56-A:1638, 1964.
18. Hohl, M. and Bucker, H.R.: *The atlantoaxial joint*. *J. Bone and Joint Surg.*, 46-A:1739–1753, 1964.
19. Fielding, J.W.: *Cineroentgenography of the normal cervical spine*. *J. Bone Joint Surg.*, 39-A:1280–1288, 1957.
20. Buoncoro, E., Hartamn, J.T. and Nelson, C.L.: *Cineradiograms of cervical spine in diagnosis of soft tissue injuries*. *JAMA*, 198:140, 1966.
21. Exner, G.: *Die halswirbelsaule. Pathologie und klinik*. Thieme, Stuttgart, 1954.
22. Hjorstjo, C.H.: *Roloscapparaten*, Gleerups, Lund, 1959.
23. Louis, R.: *Surgery of the spine. Surgical anatomy and operative approaches*. Berlin, Springer-Verlag, 1983.
24. Fick, R.: *Handbuch der anatomie und mechanik der gelenke unter berucksichtigung der bewegenden musklin*. T3, Fischer, Jena, 1911.
25. Strasser, H.: *Lehrbuch der Muskel und Galenkmechanik*. Vol. 2, Springer, Berlin, 1913.
26. Niemyer, T. and Penning, L.: *Functional roentgenographic examination in a case of cervical spondylolisthesis*, *J. Bone Joint Surg.*, 54-A: 1971–8, 1963.
27. Penning, L.: *Functional pathology of the cervical spine. Radiographic studies of function and dysfunction in congenital disors, cervical spondylosis and injuries*. New York, Excerpta Med. Fondation, 1968.
28. Lysell, E.: *Motion in the cervical spine. An experimental study in autopsy specimens*. *Acta Orthop. Scand.*, Suppl 123, 1969.
29. Jackson, R.: *The cervical syndrome*, ed. 3, Springfield Ill, Charles C. Thomas, pp 4–26, 1966.
30. Jones, M.D.: *Cineradiographic studies of the collar immobilised cervical spine*. *J. Neurosurg.*, 17:633–637, 1960.
31. Kottke, F.J. and Mundale, M.O.: *Range of mobility of the cervical spine*. *Arch. Phys Med. Rehab.* 36:379–382, 1959.

32. Bhalla, S.K. and Simmons, E.H.: Normal ranges of intervertebral joint motion of the cervical spine. *Canadian J. Surg.*, 12:181-187, 1969.
33. Cailliet, R.: Neck and arm pain. Philadelphia, F.A. Davis Co, 1964.
34. Weir, D.C.: Roentgenographic signs of cervical injury. *Clin. Orthop.* 109:9-17, 1975.
35. Green, B.A., Callahan, R.A. et al.: Acute spinal cord injury:current concepts. *Clin. Orthop.*, 125-131, 1981.
36. Catell, H.S. and Filtzer, D.L.: Pseudosubluxation and other normal variations in the cervical spine in children. *J. Bone Joint Surg.*, 47-A:1295-1309, 1965.
37. Keros, P. i sar.: Funkcionalna anatomija sustava za kretanje. Medicinska naklada, Zagreb, 1968.
38. De Seze, S., Djian, A. et Abdelmoula, M.: Etude radiologique de la dynamique cervicale dans le plan sagittal. *Rev. Rhum.*, 18:111, 1951.
39. Bonnel, F., Morel, M.: Bases anatomiques de la stabilite rachidienne. In Privat, J.M.: Osteosynthese rachidienne, Suramps Medical, Montpellier, 11-19, 1988.
40. Gregerson, G.G., and Lucas, D.B.: An in vivo study of the axial rotation of the human thoracolumbar spine, *J. Bone Joint Surg.* 49-A:247-262, 1967.
41. Greenburg, A.: Atlantoaxial dislocations. *Brain*, 91:655, 1968.
42. Weisel, S. and Rhotmann, R.: Occipitoatlantoaxial hypermobility. *Spine*, 4:187, 1979.
43. Dunlap, J.L., Morris, M., Thompson, R.G.: cervical spine injuries in children. *J. Bone Joint Surg.*, 39-B:23, 1958.
44. Caffey, J.: Pediatric X-ray diagnosis. A textbook for students and practitioners of pediatrics, Surgery and Radiology, Chicago, Years book Publ., pp 205-212, 1961.
45. Juhl, J.H., Miller, S.M. and Roberts, G.W.: Roentgenographic variations in the normal cervical spine, *Radiology*, 78:591-597, 1962.
46. Hohl, M.: Normal motions in the upper portion of the cervical spine. *J. Bone Joint Surg.*, 46-A:1777-1779, 1964.
47. Shanks, S.C. and Karley, P.: A textbook of X-ray diagnosis. Philadelphia, W.B. Saunders Co., 1959.
48. Finemann, S., Borrelli, F.J., Rubinstein, B.M., Epstein, H. and Jacobson, H.G.: The cervical spine: transformation of the normal lordotic pattern into a linear pattern in the neutral posture. *J. Bone Joint Surg.*, 45-A:1179-1183, 1963.
49. Cattell, H.S., and Filtzer, D.L.: Pseudosubluxation and other normal variations in the cervical spine in children. *J. Bone Joint Surg.*, 47-A:1295-1309, 1965.
50. Bailey, R.W.: Missed fractures of the cervical spine. *Wis. Med. J.*, 63:333, 1964.
51. Fielding, J.W. and Hawkins, R.J.: Atlantoaxial rotatory fixation. *J. Bone Joint Surg.*, 59-A:37-44, 1977.
52. Sullivan, C.R., Bruwer, A.J. and Harris, L.E.: Hypermobility of the cervical spine in children: a pitfall in the diagnosis of cervical dislocations. *Am. J. Surg.*, n.s., 95:636-640, 1958.
53. White, A.A. III, Johnson, R.M., Panjabi M.M. and Southwick, W.O.: Biomechanical analysis of clinical stability in the cervical spine. *Clin. Orthop.*, 109:85-96, 1975.
54. Vines, F.S.: The significance of occult fractures of the cervical spine. *Radiology*, 107:493, 1969.

55. Beatson, T.R.: Fractures and dislocations of the cervical spine, *J. Bone Joint Surg.*, 54-B:21, 1963.
56. Crenshaw, H.H.: *Campbell's operative orthopaedics*, ed. 5, St Louis, Mosby Co., p. 619, 1971.
57. Panjabi, M.M., Hausfeld, J.N. and White, A.A.: A biomechanical study of the ligamentous stability of the thoracic spine in man. *Acta Orthop. Scand.*, 52:315, 1981.
58. Posner, I., White, A.A., Edwards, W.T., and al.: A biomechanical analysis of clinical stability of the lumbar and lumbosacral spine. *Spine*, 7:374-389, 1982.
59. Winter, R.B., Moe, J.H. and Wang, J.F.: Congenital kyphosis. *J. Bone Joint Surg.*, 55-A:223-256, 1973.