



Servikal Spinal Biyomekanik

Cervical Spinal Biomechanics

Ahmet Levent AYDIN¹, Caner GÜNERBÜYÜK², Mehmet Yiğit AKGÜN¹, Önder ÇEREZCİ³, Tunç ÖKTENOĞLU¹

¹Koç Üniversitesi Tıp Fakültesi, Nöroşirürji Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye

²Koç Üniversitesi Tıp Fakültesi, Ortopedi ve Travmatoloji Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye

³Amerikan Hastanesi, Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Bölümü, İstanbul, Türkiye

Yazışma adresi: Ahmet Levent AYDIN ✉ ahmetleventaydin@yahoo.com

ÖZ

Omurganın servikal bölümü, diğer omurga bölümlerinden daha hareketlidir. Kranioservikal blok ve orta-alt servikal vertebralar olmak üzere iki fonksiyonel birimden oluşur. Bu iki birim, biyomekanik ve yapısal açıdan farklılıklar göstermektedir. Atlantoaksiyel bölge, anatominin ve fonksiyonun benzersiz bir entegrasyonunu temsil eder ve başın hem bireysel hem de birleşik hareketlerle üç boyutlu hareketine izin verir. Orta-alt servikal vertebra, C2-3 intervertebral segmentlerden C7-T1 segmentlere kadar olan bölgeden meydana gelir. Servikal vertebranın hareketi, her segmentte bulunan bir çift zigapofiziyal, unkovertebral ve disk eklemlerini içeren eklemlerden meydana gelir. Subaksiyel servikal vertebraların stabilitesini değerlendirmek üzere birçok biyomekanik ve klinik çalışma gerçekleştirilmiştir. Klinik çalışmalar göstermiştir ki, ligamentöz ve müsküler stabilizatörlerin rezeksiyonu, çocuklarda ve erişkinlerde instabiliteye neden olmaktadır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Biyomekanik, Servikal, Omurga, Spinal

ABSTRACT

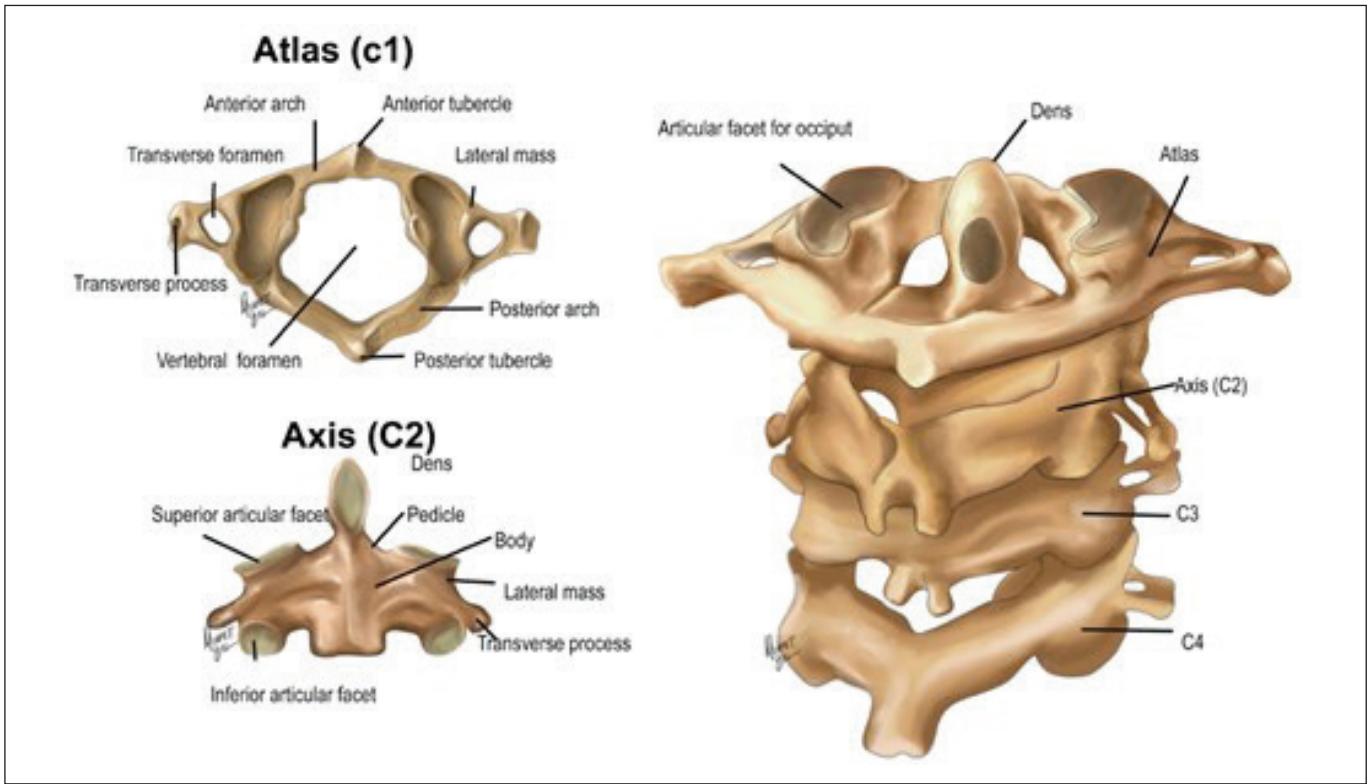
The cervical region of the spine is more flexible than other spinal regions. It consists of two functional units, the craniocervical block and the mid-lower region. These two units are different in terms of biomechanics and structure. The atlantoaxial region represents a unique integration of anatomy and function and allows three-dimensional movement of the head with both individual and combined movements. The mid-lower cervical vertebra consists of the level from the C2-3 intervertebral segments to the C7-T1 segments. The motion of the cervical vertebrae is realized through joints in each segment, including a pair of zygapophyseal, uncovertebral, and disc joints. Many biomechanical and clinical studies have been performed to evaluate the stability of subaxial cervical vertebrae. Clinical studies have shown that resection of these cervical ligamentous and muscular stabilizers causes instability in children and adults.

KEYWORDS: Biomechanics, Cervical, Spine, Vertebrae

■ GİRİŞ

Omurganın servikal bölümü, 7 omurdan oluşur ve diğer omurga bölümlerinden daha hareketlidir. Atlantoaksiyel bölge, anatominin ve fonksiyonun benzersiz bir entegrasyonunu temsil eder ve başın hem bireysel hem de birleşik hareketlerle üç boyutlu hareketine izin verir.

Servikal vertebra kranioservikal blok ve orta-alt servikal vertebralar olmak üzere iki fonksiyonel birimden oluşur. Bu iki birim, biyomekanik ve yapısal açıdan farklılıklar göstermektedir. Fakat bu bölgede bulunan hayati yapıları koruyup desteklemeye ve servikal bölgede büyük miktarda hareket açığa çıkarmak gerektiğinde, iki fonksiyonel birim birlikte hareket eder (5). Kra-



Şekil 1: Üst servikal bölge kemik anatomisi.

niyoservikal blok, atlanto-okspital ve atlanto-aksiyal eklemleri içerir. Kranioservikal blok biyomekaniği, ligamentöz sistemli eklem yüzeyleri ve yüksek dereceli hareket için ise karmaşık bir kas sistemi tarafından yönetilir. Kranioservikal ligamentöz sistemdeki bir gevşeklik bu yapıdaki hareketliliğin artmasına neden olur. Belirti ve bulguları servikal omurilikteki artmış basınç, vertebral arter yetmezliği veya eklem yüzeylerinin aşırı aktivitesi şeklinde görülür (13).

Oksipito-atlanto-aksiyel bölge, oksipital kemiğe sağlam ligamanlar ile bağlanan atlas ve aksisten oluşur. Üst servikal omurga cerrahisi, kalvarial fiksasyon, bu bölgedeki omurların benzersiz anatomisi ve omurga hareketleri ile ilgili farklılıklar ve zorluklar nedeniyle karmaşıktır. Kafatasının tüm ağırlığı, özel eklem yapısı itibarıyla üzerine tam olarak oturduğu atlas, oradan da aksise aktarılır. Bu ağırlık da, alt servikal omurgaya iletilir. Üst servikal bölgedeki omurlar arasında disk dokusu olmadığından, üst servikal bölgenin stabilitesini ve hareket kontrolünü, faset eklemleri ve ligamanlar sağlar (Şekil 1, 2).

Atlanto-okspital eklemler kafanın fleksiyon-ekstansiyon hareketine büyük ölçüde, minimal düzeyde de rotasyon ve minimal yanıl eğilmeye izin verirler. Özellikle atlasın fizyolojik yapısı, fleksiyon ve ekstansiyon hareketlerini sağlar.

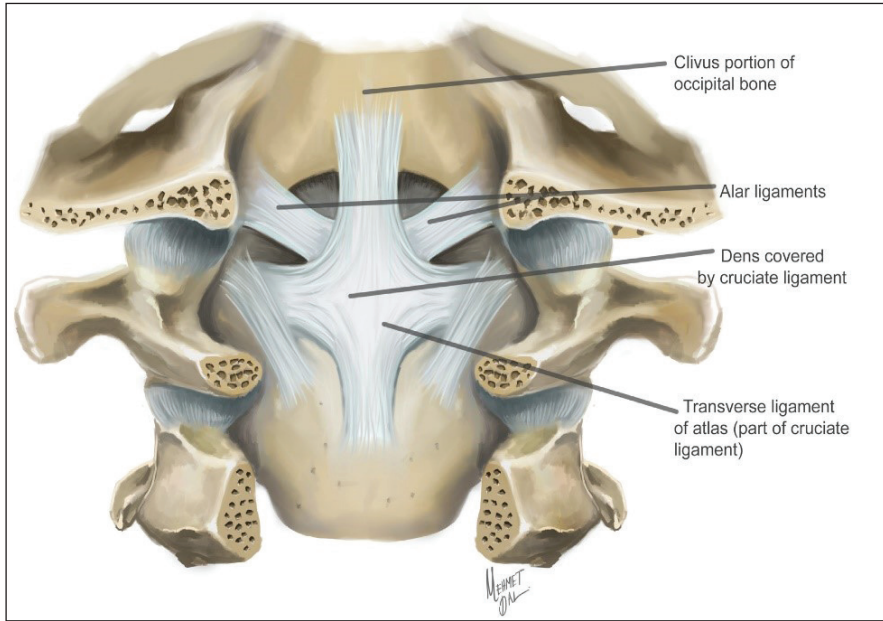
Servikal rotasyon hareketinin büyük kısmı, oksiput-C2 kompleksi arasında gerçekleşir. Oksiput-C2 arasında oluşan rotasyon hareketi her seviyede aynı olmamakla beraber bu bölgede oluşan rotasyon hareketinin toplamı, omurganın diğer herhangi bir bölgesinde gözlenenden daha fazladır. Rotasyon hareket açıklığının neredeyse tamamı, aksisin odontoid çıkıntısı etra-

fında dönmesi ile sağlanır. Transvers ligaman ve alar ligaman, bu dönme hareketi sırasında stabiliteyi sağlayarak C1'in öne kaymasını önler. Oksipito-atlanto-aksiyel kompleksini önden ve arkadan saran ligamanlar (tektoryal membran ve anterior longitudinal ligament) ekstansiyonda stabiliteyi sağlar. Foramen magnumun ön sınırı ile oksiput-C1'deki odontoid uzantı arasındaki ilişki ve C1-2'de tektoryal membranın esnek olması bu bölgedeki hiperfleksiyonu önler.

Servikal omurgada görülen toplam rotasyonun %40'ını temsil eden 40° lik tek taraflı eksenel rotasyondur. Rotasyon kontralateral C1-2 alar ligament tarafından kontrol edilir. Tüm servikal kolonun rotasyon kapasitesinin çoğu bu eklemdedir. Ancak lateral bending hareketi, C1-C2 tarafından sabitlenir.

Atlanto-okspital eklemdede ise 13 ila 16° arası fleksiyon-ekstansiyon meydana gelir. Ayrıca bu seviyede, dönme olmadan 8° kadar lateral fleksiyon meydana gelir. Atlantoaksiyel bileşkede ise, fleksiyon-ekstansiyon hareketi toplamda 10-13° lik bir hareketi oluşturur. Üst servikal bölgede eklem hareket açıklığı (EHA) Panjabi ve Meyers'in çalışmalarında incelenmiştir (9). Bu çalışmalarda, 1.5 Nm'lik momente karşılık gelen fleksiyon, ekstansiyon, yana eğilme (lateral bending) ve eksenel dönme hareket açıklıkları çalışılmıştır. Bu çalışma sonucuna göre, Oksiput - C1 (CO-C1) kompleksinin fleksiyon-ekstansiyonda en yüksek EHA'na sahip olduğu, lateral eğilmeye ise kısıtlandığı, aksiyel rotasyonda ise C1-C2 kompleksinin en büyük hareket açıklığını sağladığı gözlenmektedir.

Translasyon üst servikal omurgada da meydana gelir, ancak normalde yaklaşık 2 mm ile sınırlıdır, bunun nedeni öncelikle



Şekil 2: Oksiput-C1-C2 kemik ve ligaman anatomisi.

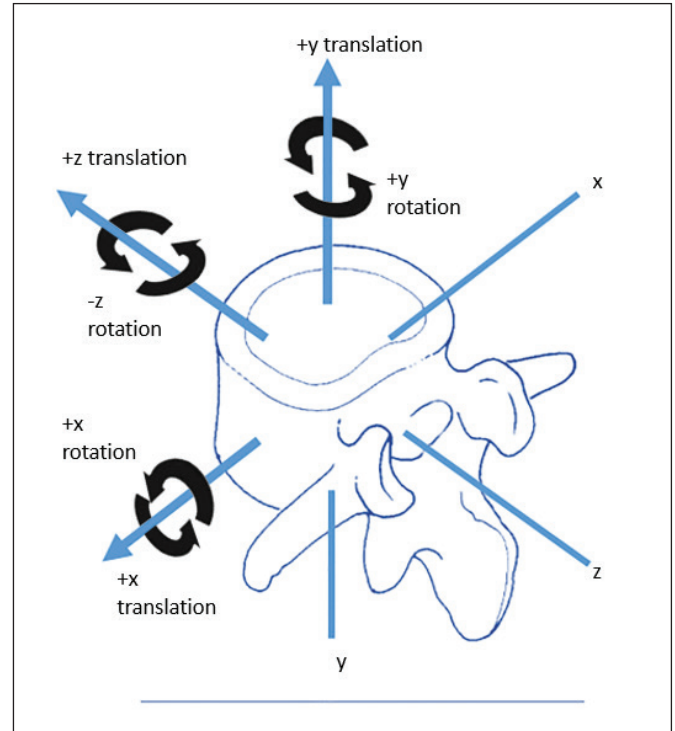
odontoid uzantı, C1 arki ve ligamentler (transvers atlantal) arasındaki anatomik ilişkidir (2,9,10,14).

Orta-alt servikal vertebra, C2-3 intervertebral segmentlerden C7-T1 segmentlere kadar olan bölgeden meydana gelir. Servikal vertebra hareketi, her segmentte bulunan bir çift zigapofiziyal, unkovertebra ve disk eklemlerini içeren eklemlerden meydana gelir (5). White ve Panjabi intervertebral segmentlerin normal eklem hareketini, iki bölgede tanımlamıştır (13). Nötral Alan: Eklem yapılarında küçük bir dirençle karşılaşılıncaya kadar oluşan normal eklem hareketinin tamamıdır. Elastik Alan: Hareketin nötral alanının sonundan başlayarak hareketin fizyolojik sınırına kadar olan normal eklem hareketinin tamamıdır.

Servikal vertebra hareketi, özellikle suboksipital bölge, büyük bir nötral hareket alanına sahiptir. Hareketin servikal bölge orta kesimlerinde kapsüler veya ligamentöz sistemdeki gerilimin az olmasından dolayı, nötral alanda hareketin pasif kontrolü daha az sağlanacağı için kas sistemi bu bölgede hareketin aktif kontrolünü sağlamaktadır. Eğer bu bölgedeki ligamentöz sistemde bir hasar olursa, nötral alanın sınırlanması ortadan kalkacak ve stabilite sorunları gözlenecektir (5). Orta ve alt servikal bölge omurları benzer yapıdadırlar. Bu benzer yapı cerrahi kolaylaştırmaktadır. Servikal bölgenin lordodik postürü karakteristiktir. Bu postür şekli, spinal kord yaralanma riskini azaltır.

Vertebra hareketi kartezyen sistemi olarak bilinen $\pm x$, $\pm y$, $\pm z$ eksenlerinde üç rotasyon ve üç translasyon olmak üzere altı serbestlik derecesi bulunmaktadır (Şekil 3).

Klinikte bu eksenleri koronal, sagittal ve aksiyal plan olarak tanımlamaktayız. Vertebra bu eksenlerde gerek rotasyon gerekse translasyon şeklinde yer değiştirme yaparken hareket etmeyen bir nokta bulunmaktadır. Bu nokta gerçekte bir noktalar kümesinden oluşmaktadır. Buna "rotasyonun anlık eksen (RAE) (=instantaneous axis of rotation (IAR))" denilmektedir (Şekil 4).



Şekil 3: Servikal omurgada üç hareket planında (sagittal-koronal-aksial) iki yönlü olmak üzere toplam 6 hareket serbestisi bulunmaktadır.

Vertebra bir eksen etrafında yaptığı rotasyon veya translasyon hareketi sırasında diğer iki planda da rotasyon veya translasyon hareketi yapabilmektedir. Kombine hareket (coupling motion) denilen bu özelliği nedeni ile her üç planda RAE oluşmaktadır. Tek bir plandaki RAE'nin keşiştiği yer basitçe ilgili segmentin RAE'i olarak tanımlanabilir. Aynı şekilde tek

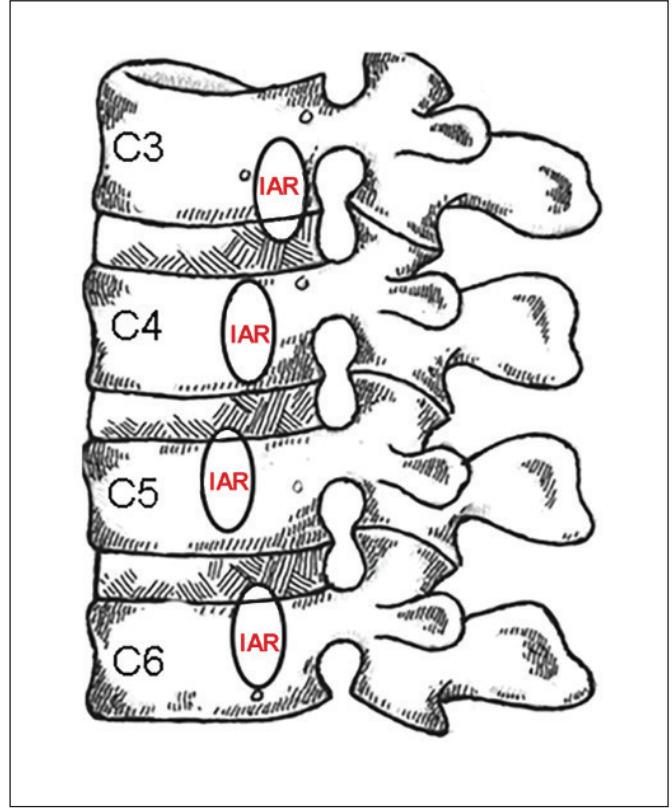
bir plandaki RAE'nin kesiştiği yer, bir nokta kümesi (centroid) olarak da tanımlanabilir. RAE'nin vücutta bilinen pozisyonlara göre hesaplanması da mümkündür (finite axis of rotations). Bu yöntem ile hata payı azaltılarak RAE'nin üç boyutlu konumu "helical axis of rotation" olarak tanımlanmaktadır. Omurga kolununun fonksiyonel biyomekanik özelliklerini tanımlayabilen en küçük birimine "fonksiyonel spinal ünite (FSU)" denilmektedir. (Şekil 5) FSU'de, iki komşu vertebra bir disk mesafesi, faset eklemleri ve ligamanlar bulunmaktadır (5,13).

Servikal omurgada temel üç ana hareket vardır: Sagittal planda fleksiyon-ekstansiyon, koronal planda yana eğilme (lateral bending) ve aksiyel planda rotasyon. İn vitro kadavra çalışmalarına göre servikal bölgede toplam fleksiyon $41.8 \pm 16.4^\circ$, ekstansiyon $51 \pm 20.8^\circ$, toplam aksiyel rotasyon $89.7 \pm 12.9^\circ$, toplam lateral bending $55.4 \pm 12.2^\circ$ olarak tespit edilmiştir (3). Kas gruplarının etkisi ile bu değerler şu şekilde değişmektedir. Fleksiyon/ekstansiyon 141.3° , yana eğilme (lateral bending) 91.4° ve aksiyel rotasyon 175° . Bu bölgede fleksiyon-ekstansiyon hareketi en fazla atlantookspital bölgede olmaktadır. Toplam hareket aralığı $27.4 \pm 71^\circ$ 'dir. Bu hareket aralığında nötral bölge $17.2 \pm 5.9^\circ$ ile hareket aralığının %65'lik bölümünden sorumludur. Aksiyel rotasyon ise $56.7 \pm 4.8^\circ$ hareket aralığı ile en fazla C1-2 arasında olmaktadır. Her iki taraflı lateral bending hareketi $6.5 \pm 2.3^\circ$ ile üst servikal bölgede en az C1-2 aralığında olmaktadır. Alt servikal bölgedeki fleksiyon ve ekstansiyon hareketine bakıldığında en fazla hareket C5-6 bölgesinde ($5.5 \pm 2.6^\circ$ ve $4.8 \pm 1.9^\circ$) görülmektedir. Koronal plandaki servikal faset yapısından dolayı (Şekil 6) yana eğilme (lateral bending) ortalama 9.3° ile en fazla C2-5 segmentlerinde olmaktadır. Servikal bölgede RAE üst servikal bölgede C2 densinin arkasında bulunurken, alt servikal bölgede vertebra cisminin arka tarafında disk mesafesinin yakınındadır (6).

Servikal omurga nötral zon içinde nispeten az bir kuvvetle hareket edebilmektedir. Bu hareket arki için paraspinal kaslar çok az enerji harcar. Nötral zonun dışında hareketler için yumuşak doku kaynaklı elastik kuvvetlerin üzerinde bir güç gerekir. Bu bölge elastik bölge olarak tanımlanır. Belirli bir segmentteki, nötral ve elastik zonu kapsayan hareket alanına, hareket aralığı (ROM; range of motion) denir. Nötral zonda ya da hareket aralığında anormal artış varlığında, ligamentöz yaralanma ya da omurga instabilitesi akla gelmelidir.

Rotasyon anlık eksen, omurgayı çevresinde döndüren eksenidir. Fleksiyon ve ekstansiyon sırasında alt omurun üst bölümünde, gövdenin 1/3 arka kısmında yer alır. Alt servikal omurgada başlıca hareket arki fleksiyon-ekstansiyondur. Aksiyel rotasyon tüm segmentlerde yaklaşık $0-10^\circ$ kadar olup hemen hemen eşittir. Lateral fleksiyon C2-3'ten C6-7'ye oldukça azalmaktadır. Yaklaşık $3-6^\circ$ arasındadır (6).

Subaksiyel servikal vertebraların stabilitesini değerlendirmek üzere birçok biyomekanik ve klinik çalışma gerçekleştirilmiştir. 1978'de Panjabi ve ark. servikal kadavra spesmenlerine 5'er kilogramlık artan aksiyel yüklenme modelleri oluşturup ventral ve dorsal yumuşak doku hasarlanmalarının stabilizeye etkisini değerlendirdi. Disk seviyesinde 3.3 mm 'den fazla kayma veya 3.8° 'den fazla rotasyona neden olan ventral yaralanmaları instabil olarak kabul ettiler. Ayrıca, interspinöz mesafede 27 mm 'den fazla açılma veya 30° 'den fazla açılma oluşturan



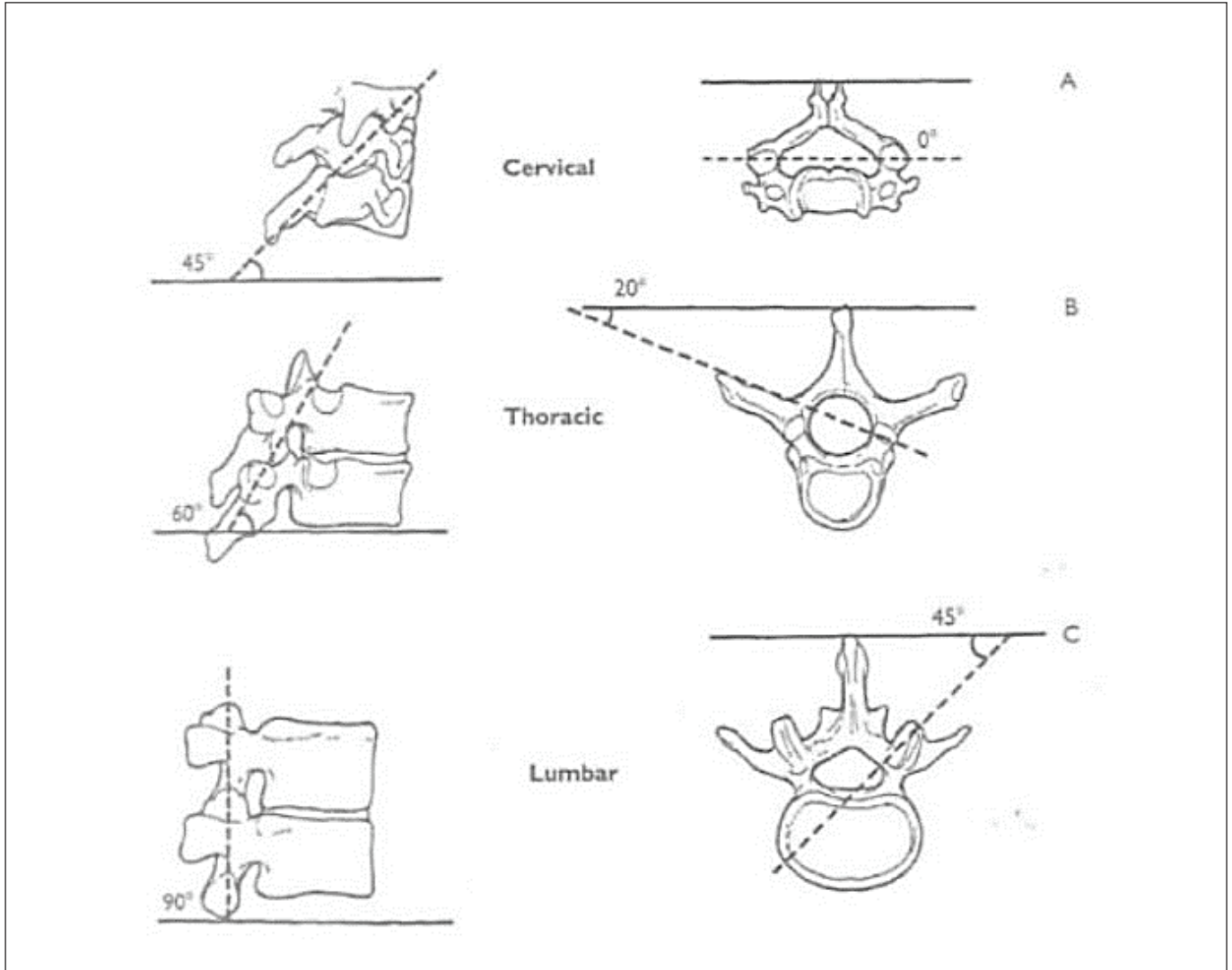
Şekil 4: Servikal bölgede hareketin anlık ekseninin şematik görünümü.



Şekil 5: Bir fonksiyonel spinal ünite iki komşu vertebra, intervertebral disk dokusu ve bu yapıları birbirine bağlayan ligamanlardan oluşur.

aksiyel yüklenme yaralanmalarını da instabil olarak tanımladılar (11).

Servikal omurganın dorsal stabilizatörleri olarak tanımlanan supraspinöz ligaman, interspinöz ligaman ve ligamentum flavum, spinöz çıkıntılar ve laminalardaki tutunma noktalarına yapışır. Klinik çalışmalar göstermiştir ki, bu dorsal stabilize-



Şekil 6: Faset eklem oryantasyonları, servikal bölgede omurganın diğer bölgelerine göre daha fazla koronal plandadır.

Tablo I: Panjabi'nin Çalışmasına Göre C0-C1-C2 Hareket Aralığı

Yüklenme Durumu	Seviye	Panjabi ve ark. (11)	Panjabi ve Meyers (9)
Flexiyon	C0-C1	10.8-17.2°	-
	C1-C2	9.8-16.2°	-
Ekstansiyon	C0-C1	10.8-17.2°	-
	C1-C2	6.0-16.0°	-
Flexiyon - Ekstansiyon	C0-C1	-	24.5 (4.0) °
	C1-C2	-	22.4 (4.7) °
Lateral Bending	C0-C1	2.6-8.6°	5.5 (2.5) °
	C1-C2	3.8-19.6°	6.7 (4.4) °
Aksiyel Rotasyon	C0-C1	1.0-10.5°	7.3 (2.2) °
	C1-C2	24.2-46.4°	38.9 (5.4) °

Tablo II: Alt Servikal Seviyelerin Hareket Segmentlerinin ROM Miktarı (7)

	Eksenel rotasyon	Yana eğilme	Fleksiyon	Ekstensiyon
C3-4	11°	11°	7°	9°
C4-5	12°	13°	10°	8°
C5-6	10°	15°	10°	11°
C6-7	9°	12°	13°	5°
C7-T1	8°	14°	6°	4°

törlerin rezeksiyonu, çocuklarda ve erişkinlerde instabiliteye neden olmaktadır (1). Goel ve ark.nın kadavra çalışmasında, çoklu seviye servikal laminektomi yapıldığında fleksiyon-ekstensiyon hareketinde %10 artış olduğu gösterilmiştir (4). Başka bir in vitro çalışmada çoklu seviye dorsal elemanların korunduğu servikal laminoplasti tekniğinde belirgin bir instabilite saptanmamıştır (8).

Servikal faset eklemler ve eklem kapsülü servikal omurganın stabilitesine önemli katkı sağlarlar. Zdeblick'in kadavra çalışmasında, fasetlerin bilateral %50'den fazla rezeksiyonu veya faset kapsülünün bilateral %50'den fazla sıyrılması instabiliteye sonuçlanmıştır (15). Cusick'in kadavra çalışmasında bilateral fasetektomiyle segmentin servikal stabilitesi %53 azalırken unilateral fasetektomide ise %32'lik bir azalma olduğu ileri sürülmüştür (4). Schulte ve ark., C5-C6 anterior izole diskektomi sonrası, fleksiyonda %66, ekstensiyonda %69, yana eğilmede (lateral bending) %41 ve aksiyel rotasyonda %40 artış gözlemlenmiştir (12).

■ KAYNAKLAR

- Bell DF, Walker JL, O'Connor G, Tibshirani R: Spinal deformity after multiple-level cervical laminectomy in children. *Spine* 19(4):406-411, 1994
- Erbulut D, Mümtaz M, Özer AF: Servikal omurganın biyomekaniği. In: Özer AF ed. *Servikal Omurga Cerrahisi*. US Akademi, 2021:21-29
- Gertzbein SD, Seligman J, Holtby R, Chan KH, Kapasouri A, Tile M, Cruickshank B: Centrod patterns and segmental instability in degenerative disc disease. *Spine (Phila Pa 1976)* 10(3):257-261, 1985
- Goel VK, Clark CR, Harris KG, Schulte KR: Kinematics of the cervical spine: Effects of multiple total laminectomy and facet wiring. *J Orthop Res* 6(4):611-619, 1988
- Kisner C, Colby LA: The spine: Exercise interventions. In: Kisner C, Colby, LA, ed. *Therapeutic Exercise: Foundations and Techniques*. 5th ed. Philadelphia: Fa Davis, 2012
- McDonald CP, Bachison CC, Chang V, Bartol SW, Bey MJ: Three-dimensional dynamic in vivo motion of the cervical spine: Assessment of measurement accuracy and preliminary findings. *Spine J* 10(6):497-504, 2010
- Naderi S, Karakoç Y: *Biyomekaniğin Temelleri*. Sağlık Bilimleri Üniversitesi Yayınları, 2020
- Nowinski GP, Visarius H, Nolte LP, Herkowitz HN: A biomechanical comparison of cervical laminoplasty and cervical laminectomy with progressive facetectomy. *Spine* 18(14):1995-2004, 1993
- Panjabi M, Dvorak J, Crisco J 3rd, Oda T, Hilibrand A, Grob D: Flexion, extension, and lateral bending of the upper cervical spine in response to alar ligament transections. *J Spinal Disord* 4(2):157-167, 1991
- Panjabi M, Dvorak J, Crisco JJ 3rd, Oda T, Wang P, Grob D: Effects of alar ligament transection on upper cervical spine rotation. *J Orthop Res* 9(4):584-593, 1991
- Panjabi MM, White AA 3rd, Keller D, Southwick WO, Friedlaender G: Stability of the cervical spine under tension. *J Biomech* 11(4):189-197, 1978
- Schulte K, Clark CR, Goel VK: Kinematics of the cervical spine following discectomy and stabilization. *Spine* 14(10):1116-1121, 1989
- White AA, Panjabi M: *Clinical Biomechanics of the Spine*, 2nd ed. Philadelphia: JB, Lippincott, 1990:97-98
- Yoganandan N, Arun MWJ, Dickman CA, Benzel EC: Practical anatomy and fundamental biomechanics In: Steinmetz MP, Benzel EC, eds. *Spine Surgery, Techniques, Complications, Avoidance, and Management*. Elsevier, 2017:58-82
- Zdeblick TA, Abitbol JJ, Kunz DN, McCabe RP, Garfin S: Cervical stability after sequential capsule resection. *Spine* 18(14):2005-2008, 1993