

## Üst Servikal Bölgenin Biyomekaniği Biomechanics of the Upper Cervical Region

### ÖZ

Omurganın diğer bölümlerine göre daha hareketli bir yapıya sahip olan servikal bölge, üst ve alt servikal bölge olmak üzere 2 kısımda incelenmektedir. Üst servikal bölge, alt servikal bölgeye göre daha farklı anatomik ve biyomekanik özelliklere sahiptir. Diğer omurga bölümlerine göre özelleşmiş eklem ve ligaman sistemi sayesinde başın hareket kabiliyetinin büyük kısmını üstlenen üst servikal bölgenin ligaman sistemi aynı zamanda servikal bölgenin stabilitesine önemli katkıda bulunur. Yapılan çalışmalarda bu eklem ve ligaman sistemlerinde oluşabilecek herhangi bir hasarlanmanın instabiliteye sebebiyet verebileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Biyomekanik, Ekstansiyon, Fleksiyon, Rotasyon, Üst servikal

### ABSTRACT

The cervical region, which has a more mobile structure than other parts of the spine, is examined in 2 parts as the upper and lower cervical regions. The upper cervical region has different anatomical and biomechanical features than the lower cervical region. The ligament system of the upper cervical region, which undertakes most of the mobility of the head under favour of the joint and ligament system specialized compared to other spinal parts, also contributes significantly to the stability of the cervical region. Studies have shown that any damage that may occur in these joint and ligament systems can cause instability.

**Keywords:** Biomechanics, Extension, Flexion, Rotation, Upper cervical

### GİRİŞ

Üst servikal bölge kranyum ile yaptığı eklem nedeniyle kranyovertebral bileşke (KVB) ya da kranyoservikal bileşke (KSB) olarak da adlandırılır. Bu bölge, oksiput (C0), C1 (axis) ve C2 (atlas) tarafından oluşturulan, kendine has anatomik ve biyomekanik özellikleri olan bir bölgedir. Bu anatomik yapılar atlanto-okspital ve atlanto-aksiyel eklemler ve ligamanlarla birbirine bağlanır (Şekil 1).

Bu bölgenin önemli bir özelliği de hayati öneme sahip nöral ve vasküler yapıları (beyin sapı, omurilik, vertebral arterler) içermesidir.

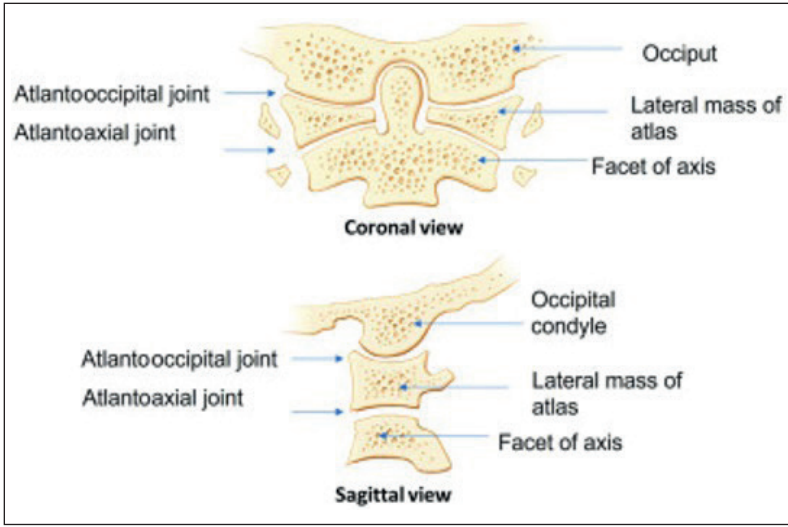
Başı omurgaya bağlayan ve omurganın en hareketli bölgesi olan bu yapının stabilitesinin travma, enfeksiyon, romatizmal hastalıklar, neoplastik sorunlar ya da konjenital gelişim anomalileri, gibi nedenlerle bozulması, çok ciddi sorunlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, bu bölgenin anatomisinin, biyomekanik özelliklerinin bilinmesi erken tanı ve doğru tedavi şeklinin belirlenmesinde hayati öneme sahiptir.

### Anatomi

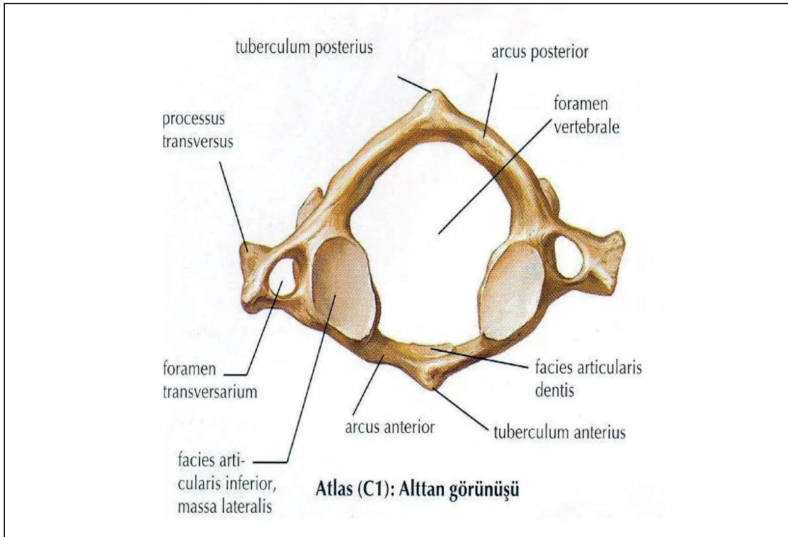
#### Kemik Anatomisi

Oksipital kemiğin anterior kısmında bulunan klivus ponsa horizontal destek sağlar ve posterior – inferiora doğru bir eğim ile inerek foramen magnumun anterior sınırını oluşturur ki bu noktaya basion adı verilir. Oksipital kemiğin squamöz kısmı ise foramen magnumun posterior sınırını (opisthion) oluşturur (19,44). Foramen magnumun antero-lateral sınırını ise oksipital kondiller oluşturur. Hipoglossal kanallar oksipital kondillerin medial ve superiorunda yer alırlar (25,49). Yapılan çeşitli çalışmalarda foramen magnumun farklı şekillerde geliştiği gösterilmiştir; yuvarlak, tetragonal, düzensiz, pentagonal ya da heksagonal şekillerde olabilmektedir (9,16,48).

Atlas, servikal bölgenin ilk omurudur. Dairesel şekilde olup, korpusu yoktur. Anterior halka anterior tuberkülü içerir, posterior halka posterior tuberkülü içerir, iki tarafta lateral mass (yan kütle) ve iki taraflı transvers çıkıntılar (process) den oluşmuşlardır (23,39) (Şekil 2). İki taraflı transvers prosesler içerisinde foramen transversarium bulunur ve bunların içerisinde vertebral arterler geçer (6,78). Posterior halkanın



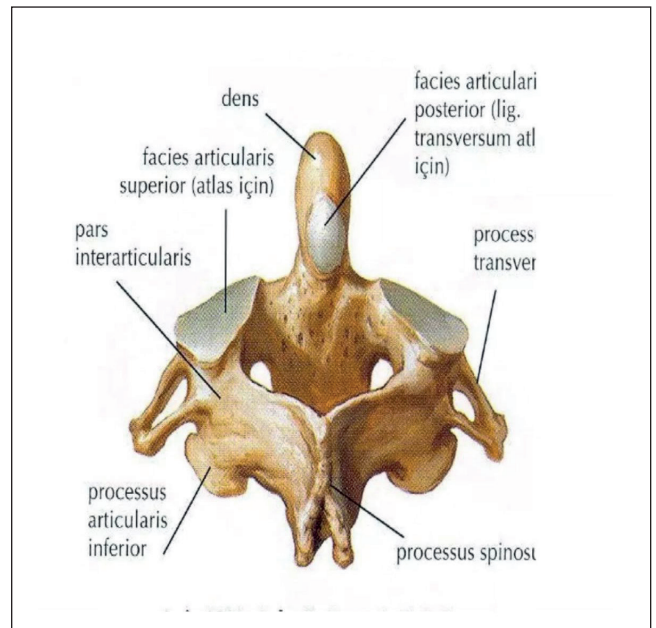
Şekil 1: Koronal ve sagittal planda başın üst servikal bölge ile yaptığı eklemler.



Şekil 2: C1 vertebra anatomisi.

superior lateralinde bulunan oluk sulcus arteriosus adını alır ve vertebral arterin horizontal kısmı (V3) buradan geçer (7,24,74). Yapılan anatomik çalışmalarda %15 oranında bu oluğun bir de tavanı olduğu saptanmıştır bu anatomik yapı arcuate foramen olarak adlandırılır (13). Atlas düzeyindeki omurganın kanal büyüklüğü, diğer tüm omurga segmentlerinden daha geniştir (69). Oksiput ile yaptığı atlanto-oksipital eklem, başın orta derece fleksiyon-ekstansiyon hareketi ile yana eğilmeye (lateral bending) olanak sağlarken, C1 ve C2 omurları arasında oluşan atlanto-aksiyel eklemden ana hareket eksenel rotasyondur (3,35,50).

Aksis, ikinci servikal omurdur. Yapısal olarak bu omur da kendine hasır (Şekil 3). Vertebra korpusu, odontoid proses (dens), pediküller, faset eklemleri, laminalar, pars interarticularis ve büyük, bifid bir spinöz prostesten oluşmuştur (69). C2 vertebra, üst ve alt servikal segmentler arasında bir geçiş görevi üstlenir. Büyük bir spinöz çıkıntıyla birlikte, C1 vertebraasının etrafında rotasyon hareketini yaptığı dens adı verilen bir çıkıntıya sahiptir. Suboksipital üçgenin medial kenarını oluşturan rectus capitis kası ile suboksipital üçgenin inferior sınırını belirleyen obliquus capitis inferior kası, aksisin spinöz çıkıntısından orijin alırlar (67,70).



Şekil 3: C2 vertebra anatomisi.

### Eklem Anatomileri

Atlanto-oksipital ve atlanto-aksiyel eklemler bilateral bulunan synovial eklemlerdir (53). Eklemde sahip olduğu oryantasyon, hareketin yönüne olanak sağlamaktadır. Atlanto-oksipital eklem koronal ve sagittal düzlemde kap şeklinde olduğu için (11,37) başlıca fleksiyon-ekstansiyon hareketi ve yana eğilme (lateral bending) olurken sınırlı derecede rotasyonel hareket olur (62).

Atlanto-aksiyel eklem 3 bölümden oluşur. Bunlardan birincisi orta hatta atlas ile odontoid arasındaki median atlantoaksiyel eklem, diğer ikisi ise faset eklemlerdir (lateral atlanto-aksiyel eklemler). Bu eklem konveks oryantasyonda olması nedeniyle (8,64) rotasyon hareketinin büyük çoğunluğu atlasın odontoid etrafında dönmesi ile meydana gelmekte ve yaklaşık 47°'lik bir hareket aralığı sağlamaktadır. Fleksiyon ve ekstansiyon hareketleri ise daha çok atlanto-oksipital eklem tarafından sağlanır. Bu eklemde hareket aralığı ise hem fleksiyon hem de ekstansiyonda yaklaşık 17° kadardır (Tablo I) (55). Hem rotasyon hem de fleksiyon ve ekstansiyon hareketleri alt servikal omurlara inildikçe azalmaktadır.

Omurganın hareketinde birleşik hareketler (coupled motions) olduğu da unutulmamalıdır. KVB (KSB) bölgesinde sagittal, koronal ya da aksiyal planda gerçekleşen tüm temel hareketlere translyasyon hareketi de eşlik etmektedir (60). Başın fleksiyon ve ekstansiyon hareketi sırasında atlanto-oksipital ve atlanto-aksiyel eklemler sagittal planda harekete katkıda bulunurken atlanto-aksiyel eklemde ciddi miktarda aksiyel rotasyon hareketi oluşur (26). Bu bölgede yapılan yana eğilme (lateral bending) hareketinde ise atlanto-oksipital eklemlerde eşit derecede fleksiyon-ekstansiyon ve aksiyel rotasyon birleşik hareketi görülürken, atlanto-aksiyel eklemde daha fazla aksiyel rotasyon hareketi eşlik eder (29). Son olarak primer aksiyel rotasyon hareketinde bu harekete en faz-

**Tablo I:** Panjabi'nin Çalışmasına Göre Üst Servikal Bölge Hareket Aralığı (54).

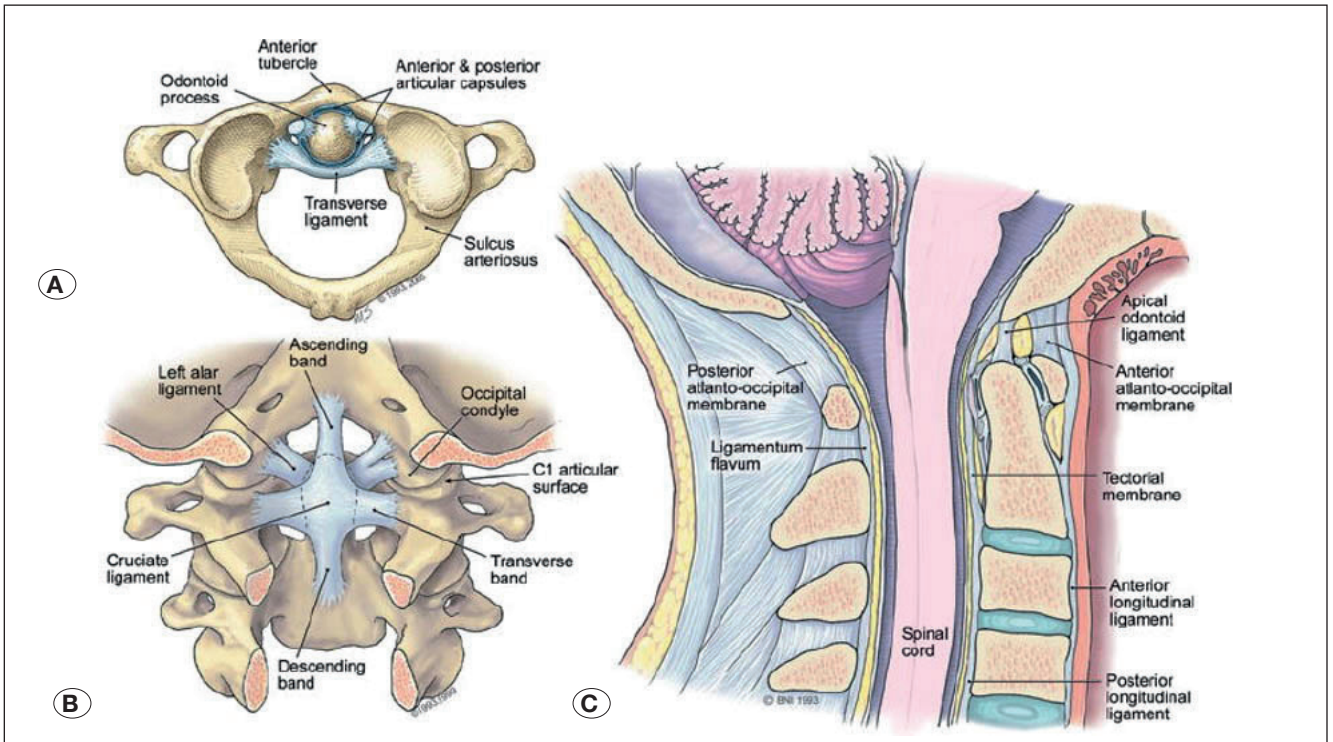
Yüklenme Durumu	Seviye	Panjabi ve ark.
Fleksiyon	C0-C1	10.8-17.2°
	C1-C2	9.8-16.2°
Ekstansiyon	C0-C1	10.8-17.2°
	C1-C2	6.0-16.0°
Lateral Bending	C0-C1	2.8-8.6°
	C1-C2	3.8-19.6°
Aksiyel Rotasyon	C0-C1	1.0-10.5°
	C1-C2	24.2-46.4°

la katkı sağlayan atlanto-aksiyel eklemde fleksiyon ve yana eğilme hareketi olurken atlanto-oksipital eklemde fleksiyon ve ekstansiyon hareketi birleşik hareket olarak görülür (45).

### Ligaman Sistemi

KVB de hareketin yönü atlanto-oksipital ve atlanto-aksiyel eklemler tarafından belirlenirken bu bölgenin stabilitesi kemik yapıların yaptığı eklemler kadar içerdiği ligaman tarafından sağlanır (Şekil 4).

KSB, önde 5 ligaman ile stabilize edilir; Anterior atlanto-oksipital membran, Tektoryal membran, Transvers ligaman, Alar ligamanlar ve Apikal ligaman. Posteriordan stabilize eden yapılar ise: Ligamentum nuchae, İnterspinöz ligaman, Posterior atlanto-oksipital membran, Ligamentum flavum ve boyun kaslarıdır.



**Şekil 4:** Üst servikal bölge ligaman sistemi (57).

Ligamentöz yapıların anatomik ve kinematik özellikleri şu şekilde özetlenebilir;

- **Anterior atlantookspital membran :** Anterior longitudinal ligamanın uzantısıdır. Foramen magnum'un önünde sonlanır ve başın aşırı ekstansiyonunu sınırlar.
- **Posterior atlantookspital membran:** Atlasın arka arkusu ile Foramen magnum'un dorsal kenarı arasında uzanır. Başın fleksiyonunu sınırlar.
- **Tektoryal membran:** Posterior longitudinal ligamanın devamıdır. C2 vertebra korpusunun dorsalinden başlayarak yukarı uzanır. Odontoid çıkıntının dorsalinden geçer ve foramen magnumun ön kenarına (özellikle oksipital kemiğin veya klivusun baziler kısmının üst bölgesine) yapışır. Tektoryal membran yüzeysel ve derin liflere sahiptir. Derin lifler, oksipital kemiğin baziler kısmına kadar uzanan bir medyan banda sahiptir. İki yanal derin lif bandı, oksiputa bağlanmadan önce atlanto-oksipital eklemlerin medialinden geçer. Yüzeysel lifler, derin liflerden daha yukarıya doğru uzanır ve oksipital kemiğin (klivus) baziler kısmının üst bölgesinde kranyal dura mater ile karışır. Alar ligaman ile birlikte başın servikal omurga üzerinden anterior subluksasyonunu önler ve fleksiyonu sınırlar. Bu ligaman, atlanto-oksipital eklemin özellikle fleksiyonunu kısmen de ekstansiyonunu sınırlar (71).
- **Krusiform ligaman:** Birkaç farklı parçadan oluşur. *Transvers atlantal ligaman* C1 vertebra yan kitleleri arasında densin posteriorundan uzanarak geçer. Krusiform ligamanın diğer parçaları ise transvers ligamandan yukarı ve aşağı uzanım gösteren *superior ve inferior longitudinal ligaman* parçalarıdır. Superiora uzanan kısım basiona tutunur, inferiora uzanan ligaman ise densin gövdesine tutunur. Bu ligaman yapısı densin posteriorunda yer alır ve densin atlasın ön halkasından 3 mm geride tutar. KVB'nin en önemli ligaman yapılarından birisidir.
- **Alar ligaman:** Oksipital-alar ve atlanto-alar olarak bir çift ligamandır. Oksipital-alar ligaman odontoid üst uç (odontoid tip) anterolateral bölgesinden orijin alır ve foramen magnumun inferiorunda oksipital kondilin mediana tutunur (34,35). Atlanto-alar ligaman yine odontoidin tepesinden orijin alır ve atlasın lateral kütlelerinin (lateral mass) medial kısmına tutunur (14,41). Bu güçlü ligamanların başlıca görevi atlanto-oksipital ve atlanto-aksiyel eklemlerin ki böylece başın yana eğilme (lateral bending) ve aksiyel rotasyon hareketlerini sınırlamaktır (41).
- **Kapsüler ligaman:** Atlanto-oksipital ve atlanto-aksiyel eklemlerin kapsüler ligamanlarının stabiliteye izole olarak ne kadar katkı sağladıkları tam bilinmemektedir.
- **Apikal ligaman:** Dens ile foramen magnum ön kenarı arasında uzanır. Fleksiyon hareketini sınırlar.

KVB'de bulunan ligamanlar içerisinde stabiliteye en fazla katkı sağlayan ligamanlar Alar ligamanlar, Krusiform ligaman kompleksi ve Tektoryal membrandır. Diğer ligamanların; anterior ve posterior atlanto-oksipital ligamanlar ile apikal ligamanın, KVB stabilitesine ciddi bir katkıları yoktur (14).

### Nöral ve Vasküler Anatomi

Sinir kökleri isimlerini aldıkları vertebranın üzerinden çıkarlar. Örneğin, Oksiput (C0) – C1 arasından C1 sinir kökü çıkar.

C1 sinir kökünün posterior kısmı başlıca motor lifleri içerir ve suboksipital sinir olarak da adlandırılır ve suboksipital kasları innerve eder (38). Atlas ve aksis arasından C2 sinir kökü çıkar. Büyük ve küçük oksipital sinirleri ve C3 sinir kökü ile beraber büyük auricular ve transverse servikal sinirleri oluşturur (40). Ayrıca rectus capitis anterior ile rectus capitis lateralis kaslarını innerve eder, trapezius kasının duysal liflerini sağlar (59,65). Cerrahi sırasında yeterli görüş alanı sağlamak, atlanto-aksiyel ekleme direkt füzyon yapmak, ya da yan kütle (lateral mass) vidası yerleştirmek için C2 sinir kökü sakrifiye edilebilir (57). Benzer şekilde, kanama kontrolü için vertebral arter V3 segmenti çevresinde bulunan yoğun venöz pleksus da koagüle edilebilir (5).

KVB'nin kanlanması başlıca vertebral ve oksipital arterin dalları tarafından sağlanır (44,47). Vertebral arterden çıkan anterior ve posterior assendan damarlar aksisin korpusunun ve densin ventral ve dorsal yüzeylerinden yukarı çıkıp odontoidin tepesinde alar ligaman düzeyinde anastomoz yaparlar. Bu anastomoz aynı zamanda kafa kaidesi ve alar ligaman yolu ile karotid sistemden de kan alır. Bu damarlardan çıkan küçük perforan dallar aksisin korpusunu ve odontoidi beslerler (56,68). Odontoidin tabanı ile aksisin korpusu arasında bulunan ve intervertebral disk dokusunu temsil eden kartilajenöz tabaka, aksisin gövdesi ile odontoid arasında damarsal ağ gelişmesini önler. Bu da tip II odontoid fraktürlerinde neden sağlıklı iyileşme olmadığını ya da os odontoidum gelişmesini açıklar (21,33,46).

### KVB Patolojisinin Biyomekaniği

KVB patolojisi enfeksiyon, romatizmal hastalıklar, neoplastik problemler, konjenital gelişim anomalilerine bağlı gelişebilmekle beraber en sık travma nedeniyle oluşmaktadır. Trafik kazaları, yüksekten düşme, suya balıklama atlama, ateşli silah yaralanması KVB travmasına neden olan en sık görülen travma vektörleridir. Bu travma sırasında KVB'ye çeşitli farklı kuvvet vektörleri etki etmektedir (54).

Patolojik seviyede aşırı fleksiyon hareketi, krusiform ligaman yada odontoid hasarına yol açabilir (10). Krusiform ligaman hasarı sadece ligaman hasarı olarak ya da atlantal tuberkülün avulsiyonu şeklinde olabilir (17,27,28). Yine aşırı fleksiyon hareketi sırasında tektoryal membran hasarı da oluşabilir ve bu membran rostralde dura ile birleştiği için BOS fistülü gelişebilir (15,20). İzole tektoryal membran hasarı fleksiyon-ekstansiyon hareketlerinde minör instabiliteye neden olabilir (32,52,75).

Fizyolojik sınırların üzerinde aşırı hiperekstansiyon hareketi, atlasın posterior halkasında ve/veya aksisin pars interartikularisinde ve/veya odontoid prosesde kırığa neden olabilir (2). Aşırı hiperekstansiyon sırasında oluşabilecek makaslama (shearing) tipi yaralanmada KVB'nin anterior ligamanlarında (alar ligaman, aksesuar atlantaksiyel ligaman, krusiform ligaman ve tektoryal ligaman) hasar gelişebilir (58).

Fizyolojik sınırların üzerinde olan atlanto-aksiyel eklem rotasyonu alar ligaman hasarına işaret eder (10). Alar ligaman hasarı genellikle oksipital kondileye bağlandığı noktaya yakın gelişir (66) ve rotasyonel instabiliteye neden olur ayrıca fleksiyon, ekstansiyon ve yana eğilme hareketlerinde artışa neden olur (18). Sadece alar ligaman hasarı nadir görülmeyle beraber fizyolojik sınırların üzerinde olan hiperekstansiyona eşlik eden rotasyonel harekette oluşabilir (77). Büyüklüğü ve

anatomik yerleşimi açısından alar ligaman hasarını MR ile değerlendirmek zordur (4,63). Synovial eklem kapsülünün avulsiyonu rotasyonel harekette hafif bir artışa neden olur (12), ancak bu ligaman hasarına genellikle transverse atlantal ve alar ligaman hasarı da eşlik etmesi nedeniyle önemlidir (34).

KVB'nin travmatik kompresif yüklenme travmasında, etki eden kuvvet vektörü fleksiyon, ekstansiyon ya da yana eğilme hareketine yönlendirilemediği için atlanto-oksipital bölgede kemik yapıda hasar meydana gelir. Aksiyel yüklenme travmasında atlanta patlama kırığı ile birlikte oksipital kondil kırıklarına neden olabilir. Bu tip yaralanma stabil basit kemik yaralanması olabildiği gibi, eşlik eden ligaman hasarları nedeniyle instabiliteye de neden olabilmektedir (43,72,73).

KVB bölgesinde oluşan ligaman hasarı, bu bölgede instabilite gelişmesi için yeterli olabilmektedir. Ligaman yapısının yırtılması halinde sağlıklı iyileşme olmayacağı akılda tutulmalıdır (22).

### KVB Fiksasyonu

Bu bölge anatomisinin karmaşık yapıda olması ve omurganın en hareketli bölgesi olması nedeniyle cerrahi tedaviye karar vermede ve hangi cerrahinin uygun olacağına karar vermede güçlük yaratmaktadır. Günümüze dek çok çeşitli fiksasyon teknikleri geliştirilmiştir; tel, kablo, kanca, vida, rod, plak en sık kullanılan yöntemler olmuşlardır. Daha önemlisi cerrahi alanın oldukça küçük olması nedeniyle kısıtlı kemik greft yerleştirilebileceği için füzyon gelişmesi de oldukça problemlidir.

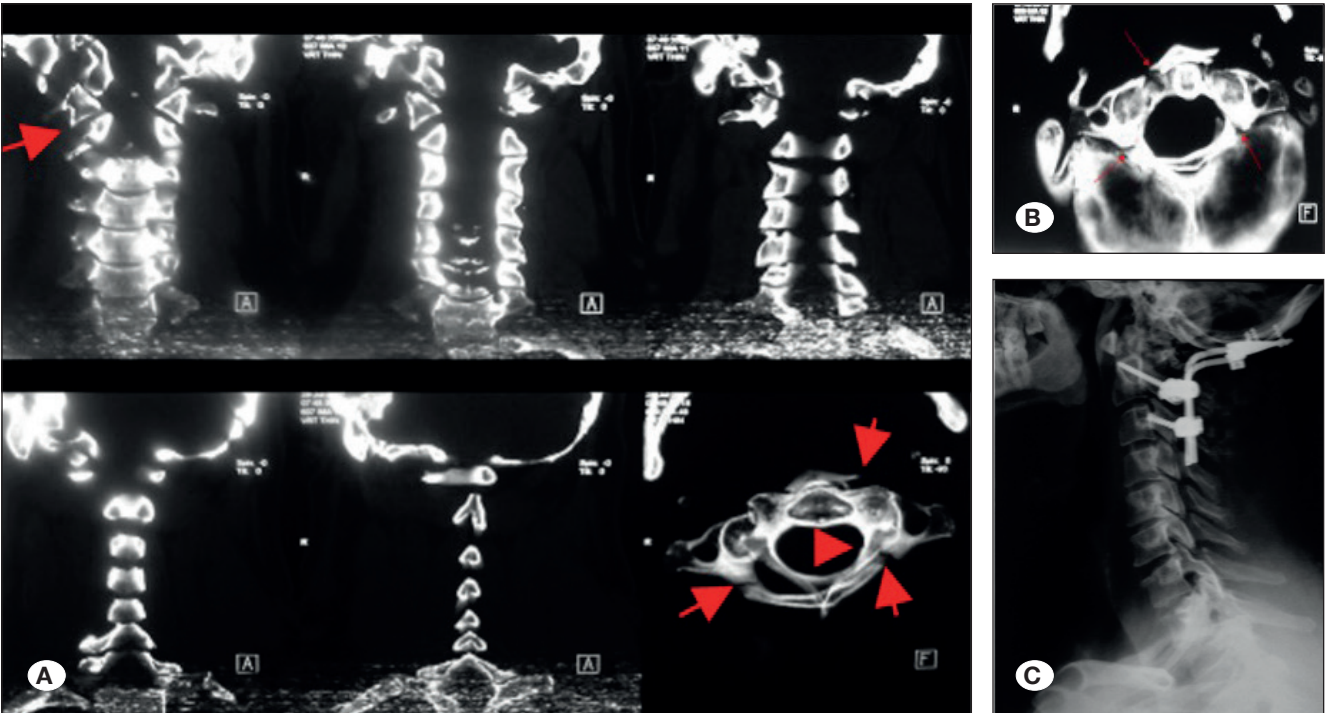
Oksiputun servikal bölgeye fiksasyonu için oksipital kemiğe açılan küçük burr-hole'den geçirilen tel veya kablolar kullanılmıştır. Ancak daha sonraki yıllarda geliştirilen vida-rod/plak sistemlerinin daha güçlü fiksasyon sağlaması nedeniyle

(30,36,51) tel/kablo kullanımı popülaritesini yitirmiştir. Oksiputa yerleştirilen vidalar geniş çaplı olup yivleri kısadır, uçları da küntr olup dura zedelenme riskini azaltmaktadır. Vida sıyrılma direncini artırmak için bikortikal yerleştirilmesi daha doğrudur. Oksipital kemik kalınlığı kişiden kişiye değişiklik göstermektedir, vidanın gücünün kemiğin kalınlığı ile orantılı olduğu gösterilmiştir (61), bu nedenle hastaya özel plak/rod yerleştirilmesi yapılmalıdır. Oksipital kemiğe uygulanan vidaların harekete etkisinin minimum olduğu biyomekanik çalışmada gösterilmiştir (1). Genel olarak oksiputa uygulanan "T" ya da "Y" şeklindeki plaklarda vidalar orta hat üzerine ya da parasagittal olarak servikal bölgeye uygulanan vidalar ile aynı hizada yerleştirilir. (Şekil 5).

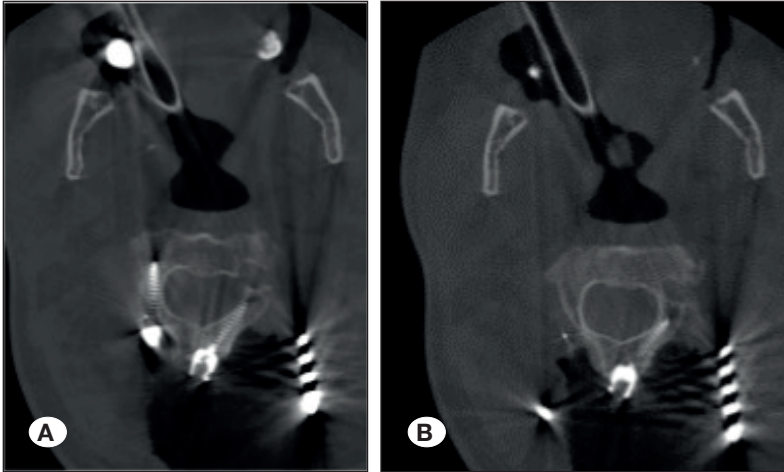
Servikal bölge fiksasyonunda da yukarıda sayılan tüm teknikler kullanılabilirle beraber en sağlam fiksasyon vida ile elde edilmektedir. Servikal bölgeye uygulanan vidalar genellikle poliaksiyel tiptedir. C1 yan kütle vidaları uzun (19-26 mm) olup bikortikal uygulanması önerilmektedir (27,76). Bikortikal vida yerleştirmede karotis arter zedelenmesi olabileceği akılda tutulmalıdır.

C2 fiksasyonu da özellik taşımaktadır. Yine sublaminar tel ya da kanca sistemleri kullanılabilirle beraber hem yeterli sağlamlıkta fiksasyon sağlamadıkları için ve hem de özellikle kanca sistemlerinde kanal içerisinde belirgin yer kapladıkları için günümüzde kullanımları azalmıştır. Aksisin vida ile stabilizasyonu için çeşitli metotlar tanımlanmıştır. C2 pars interarticularis vidalaması uygulanabilir ancak burada vertebral arter yaralanma riski nedeniyle bikortikal uygulamadan kaçınmak gerekir (75).

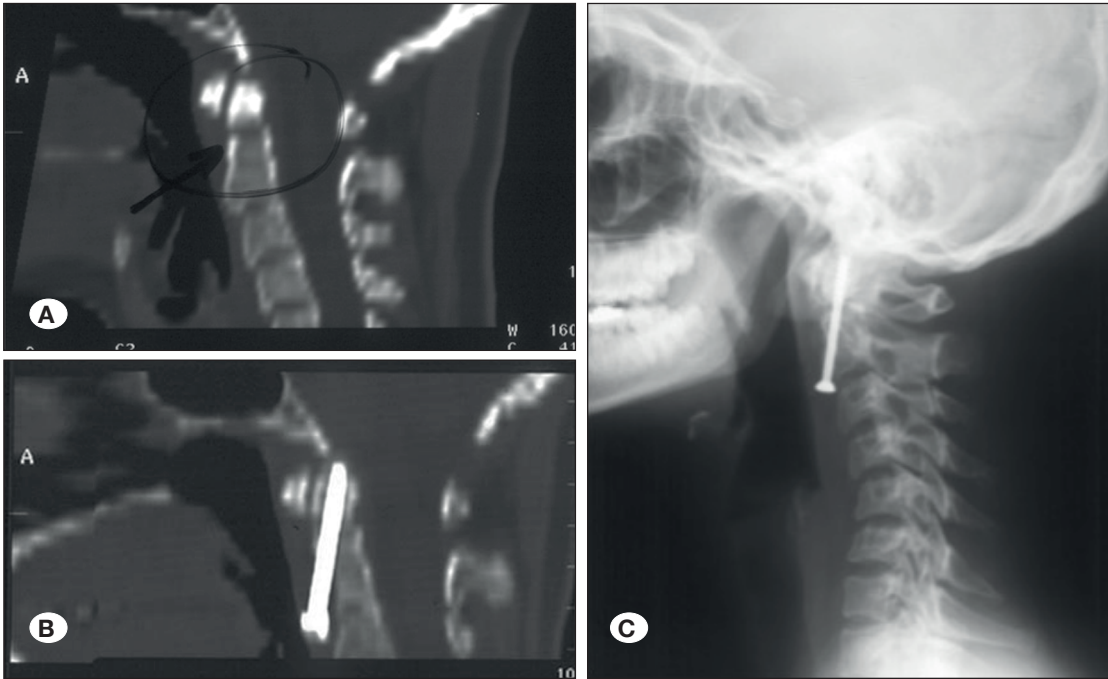
C1'in aksine aksiste pediküler yapı vardır ve vidalama için kullanılabilir, bazı hastalarda pediküllerin çok ince olması nedeniyle son yıllarda translaminar (intralaminar) vidalarda kullanılmaktadır (Şekil 6). Bu vidalar C2'nin spinöz prosesi ya-



Şekil 5: Travmatik C1 patlama kırığı (A) ve atlanto-aksiyel rotatuar dislokasyon (B) gelişen hastaya oksipito-servikal stabilizasyon (C) yapılmıştır.



**Şekil 6:** C2 sol pedikülün çok ince olması nedeniyle sol tarafa intralaminar vida (A ve B) sağ tarafa pars vida (A) yerleştirilerek C1-2 stabilizasyon yapılmıştır.



**Şekil 7:** 18 yaş kadın hasta, trafik kazası sonucu gelişen odontoid kırığı (A) anterior yaklaşım ile odontoid vidalama (B ve C) yapılmıştır.

nından lamina içerisine gönderilir (31). Yapılan çalışmalarda C2 pedikül vidası ile intralaminar vidaların benzer fiksasyonu sağladığı gösterilmiştir (27,42).

Son yıllarda navigasyon sistemlerinin kullanıma girmesiyle özellik arz eden bu bölgenin fiksasyonu çok daha güvenli bir şekilde yapılmaktadır.

Bu bölgenin bir diğer ciddi problemi de odontoid kırıklarıdır. İnstabil kırık olarak kabul edilen Tip II odontoid kırıklarında anterior yaklaşımla odontoid C2 vertebra korpusuna sabitle-nir (Şekil 7). Bu cerrahi teknik “fizyolojik cerrahi” olarak kabul edilir. Omurganın hareketli segmentleri korunmaktadır. Bu yöntemde her ne kadar 2 vida ile stabilizasyon tek vida ile stabilizasyondan daha güçlü olsa da tek vida ile stabilizasyonun yeterli biyomekanik desteği sağladığı gösterilmiştir.

## SONUÇ

Üst servikal bölge ligaman sistemi ve eklem yapısı ile diğer vertebra segmentlerden oldukça farklı anatomik ve biyo-

mekanik özelliktedir. Servikal omurganın hareketinin büyük kısmının C0-C2 arasında gerçekleşmesi ve başın ağırlığının öncelikli olarak bu bölge tarafından karşılanıyor olması ligaman sisteminin önemini ön plana çıkarmaktadır. Bu sebeple eklem ya da ligaman sisteminde meydana gelebilecek herhangi bir hasarlanmanın instabiliteye yol açabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

## KAYNAKLAR

1. Anderson PA, Oza AL, Puschak TJ, Sasso R: Biomechanics of occipitocervical fixation. Spine (Phila Pa 1976) 31:755–761, 2006
2. Beckner MA, Heggeness MH, Doherty BJ: A biomechanical study of Jefferson fractures. Spine (Phila Pa 1976) 23:1832–1836, 1998
3. Bogduk N, Mercer S. Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics. Clin Biomech (Bristol, Avon) 15(9):633–648, 2000

4. Borchgrevink G, Smevik O, Haave I, Haraldseth O, Nordby A, Lereim I: MRI of cerebrum and cervical columna within two days after whiplash neck sprain injury. *Injury* 28:331-335, 1997
5. Bruneau M, Cornelius JF, George B: Antero-lateral approach to the V3 segment of the vertebral artery. *Neurosurgery* 58:29-35, 2006
6. Cacciola F, Phalke U, Goel A: Vertebral artery in relationship to C1-C2 vertebrae: An anatomical study. *Neurol India* 52:178, 2004
7. Castillo C, Viñas F, Gutikhonda M, Diaz F: Microsurgical anatomy of the suboccipital segment of the vertebral artery. *Neurol Res* 20:201-208, 1998
8. Cattrysse E, Probyn S, Gagey O, Kool P, Clarys JP, Van Roy P: In vitro three dimensional morphometry of the lateral atlantoaxial articular surfaces. *Spine* 33:1503-1508, 2008
9. Chethan P, Prakash K, Murlimanju B, Prashanth KU, Prabhu LV, Saralaya VV, Krishnamurthy A, Somesh MS, Kumar CG: Morphological analysis and morphometry of the foramen magnum: An anatomical investigation. *Turk Neurosurg* 22:416-419, 2012
10. Clark CR, White AA III: Fractures of the dens. A multicenter study. *J Bone Joint Surg Am* 67:134-1348, 1985
11. Crawford NR, Hurlbert RJ: Anatomy and biomechanics of the craniocervical junction. *Semin Neurosurg* 13:101-110, 2002
12. Crisco JJ III, Oda T, Panjabi MM, Bueff HU, Dvorák J, Grob D: Transections of the C1-C2 joint capsular ligaments in the cadaveric spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 16(10 Suppl):S474-S479, 1991
13. Cushing K, Ramesh V, Gardner-Medwin D, Todd NV, Gholkar A, Baxter P, Griffiths PD: Tethering of the vertebral artery in the congenital arcuate foramen of the atlas vertebra: A possible cause of vertebral artery dissection in children. *Dev Med Child Neurol* 43:491-496, 2001
14. Debernardi A, D'Aliberti G, Talamonti G, Villa F, Piparo M, Collice M: The craniovertebral junction area and the role of the ligaments and membranes. *Neurosurgery* 76 Supplement:S22-S32, 2015
15. Debernardi A, D'Aliberti G, Talamonti G, Villa F, Piparo M, Collice M: The craniovertebral junction area and the role of the ligaments and membranes. *Neurosurgery* 68:291-301, 2011
16. Degno S, Abrha M, Asmare Y, Muche A: Anatomical variation in morphometry and morphology of the foramen magnum and occipital condyle in dried adult skulls. *J Craniofac Surg* 30:256-259, 2019
17. Dickman CA, Sonntag VK: Injuries involving the transverse atlantal ligament: Classification and treatment guidelines based upon experience with 39 injuries. *Neurosurgery* 40:886-887, 1997
18. Dvorak J, Schneider E, Saldinger P, Rahn B: Biomechanics of the craniocervical region: The alar and transverse ligaments. *J Orthop Res* 6:452-461, 1988
19. Emel A, Dagtekin A, Ozturk AH, Kara E, Ozturk NC, Uluc K, Akture E, Baskaya MK: Anatomical variations of the foramen magnum, occipital condyle and jugular tubercle. *Turk Neurosurg* 21:181-190, 2011
20. Farley FA, Gebarški SS, Garton HL: Tectorial membrane injuries in children. *J Spinal Disord Tech* 18:136-138, 2005
21. Fielding JW, Griffin PP: Os odontoideum: An acquired lesion. *J Bone Jt Surg Am* 56:187-190, 1974
22. Frank C, Amiel D, Woo SL, Akeson W: Normal ligament properties and ligament healing. *Clin Orthop Relat Res* 196:15-25, 1985
23. Gehweiler JA, Duff DE, Martinez S, Miller MD, Clark WM: Fractures of the atlas vertebra. *Skeletal Radiol* 1:97-102, 1976
24. George B: Extracranial vertebral artery anatomy and surgery. *Adv Tech Stand Neurosurg* 27:179-216, 2002
25. Gilsbach JM, Sure U, Mann W: The supracondylar approach to the jugular tubercle and hypoglossal canal. *Surg Neurol* 50:563-570, 1998
26. Goel V, Clark C, Gallaes K, Liu YK: Momentrotation relationships of the ligamentous occipitoatlanto-axial complex. *J Biomech* 21:673-680, 1988
27. Gorek J, Acaroglu E, Berven S, Yousef A, Puttlitz CM: Constructs incorporating intralaminar C2 screws provide rigid stability for atlantoaxial fixation. *Spine (Phila Pa 1976)* 30:1513-1518, 2005
28. Greene KA, Dickman CA, Marciano FF, Drabier J, Drayer BP, Sonntag VK: Transverse atlantal ligament disruption associated with odontoid fractures. *Spine (Phila Pa 1976)* 19:2307-2314, 1994
29. Guo R, Zhou C, Wang C, Tsai TY, Yu Y, Wang W, Li G, Cha T: In vivo primary and coupled segmental motions of the healthy female head-neck complex during dynamic head axial rotation. *J Biomech* 123:110513, 2021
30. Haheer TR, Yeung AW, Caruso SA, Merola AA, Shin T, Zipnick RI, Gorup JM, Bono C: Occipital screw pullout strength. A biomechanical investigation of occipital morphology. *Spine (Phila Pa 1976)* 24:5-9, 1999
31. Harms J, Melcher RP: Posterior C1-C2 fusion with polyaxial screw and rod fixation. *Spine (Phila Pa 1976)* 26:2467-2471, 2001
32. Harris MB, Duval MJ, Davis JA Jr, Bernini PM: Anatomical and roentgenographic features of atlantooccipital instability. *J Spinal Disord* 6:5-10, 1993
33. Hawkins RJ, Fielding JW, Thompson WJ: Os odontoideum. Congenital or acquired. *J Bone Jt Surg Am* 58:413, 1976
34. Hodak JA, Mamourian A, Dean BL: Radiologic evaluation of the craniovertebral junction. In: Dickman CA, Spetzler RF, Sonntag VKH (eds). *Surgery of the Craniovertebral Junction*. New York: Thieme, 1998:81-102
35. Hsu WK: Advanced techniques in cervical spine surgery. *J Bone Joint Surg Am* 93(8):780-788, 2011
36. Hurlbert RJ, Crawford NR, Choi WG, Dickman CA: A biomechanical evaluation of occipitocervical instrumentation: Screw compared with wire fixation. *J Neurosurg* 90 (1 Suppl):84-90, 1999
37. Izzo R, Ambrosanio G, Cigliano A, Cascone D, Gallo G, Muto M: Biomechanics of the spine III. The craniocervical junction. *Neuro Radiol J* 20:209-217, 2007
38. Jenkins S, Iwanaga J, Dumont A, Loukas M, Tubbs R: What is the suboccipital nerve? Tracking this confusing historical nomenclature. *Morphologie* 105:10-14, 2021
39. Jhavar SS, Nunez M, Pacca P, Voscoboinik DS, Truong H: Craniovertebral junction 360: A combined microscopic and endoscopic anatomical study. *J Craniovertebral Junction Spine* 7:204, 2016

40. Johnston MM, Jordan SE, Charles AC: Pain referral patterns of the C1 to C3 nerves: Implications for headache disorders. *Ann Neurol* 74:145-148, 2013
41. Kasliwal MK, Fontes RB, Traynelis VC: Occipitocervical dissociation-incidence, evaluation, and treatment. *Curr Rev Musculoskelet Med* 9:247-254, 2016
42. Lehman RA Jr, Dmitriev AE, Wilson KW: Biomechanical analysis of the C2 intralaminar fixation technique using a cross-link and offset connector for an unstable atlantoaxial joint. *Spine J* 12:151-156, 2012
43. Levine AM, Edwards CC: Fractures of the atlas. *J Bone Joint Surg Am* 73:680-691, 1991
44. Lopez AJ, Scheer JK, Leibl KE, Smith ZA, Dlouhy BJ, Dahdaleh NS: Anatomy and biomechanics of the craniovertebral junction. *Neurosurg Focus* 38:E2, 2015
45. Lorente AI, Hidalgo-García C, Rodríguez-Sanz J, Maza-Frechín M, López-de-Celis C, Pérez-Bellmunt A: Intersegmental kinematics of the upper cervical spine: Normal range of motion and its alteration after alar ligament transection. *Spine* 46:E1320-E1326, 2021
46. Menezes AH: Os odontoideum-pathogenesis, dynamics and management. In: Marlin AE (ed), *Concepts in Pediatric Neurosurgery*. Switzerland: Karger, 1988:133-145
47. Menezes AH, Traynelis VC: Anatomy and biomechanics of normal craniovertebral junction (a) and biomechanics of stabilization (b). *Child's Nerv Syst* 24:1091-1100, 2008
48. Murshed KA, Çiçekcibası AE, Tuncer I: Morphometric evaluation of the foramen magnum and variations in its shape: A study on computerized tomographic images of normal adults. *Turk J Med Sci* 33:301-306, 2003
49. Muthukumar N, Swaminathan R, Venkatesh G, Bhanumathy S: A morphometric analysis of the foramen magnum region as it relates to the transcondylar approach. *Acta Neurochirurgica* 147:889-895, 2005
50. O'Brien WT, Shen P, Lee P: The dens: Normal development, developmental variants and anomalies, and traumatic injuries. *J Clin Imaging Sci* 5:38, 2015
51. Oda I, Abumi K, Sell LC, Haggerty CJ, Cunningham BW, McAfee PC: Biomechanical evaluation of five different occipito-atlanto-axial fixation techniques. *Spine (Phila Pa 1976)* 24:2377-2382, 1999
52. Oda T, Panjabi MM, Crisco JJ III, Oxland TR: Multidirectional instabilities of experimental burst fractures of the atlas. *Spine (Phila Pa 1976)* 17:1285-1290, 1992
53. Ogoke BA: The management of the atlantooccipital and atlanto-axial joint pain. *Pain Physician* 3:289-293, 2000
54. Olinger C, Bransford R: Upper cervical trauma. *Orthop Clin North Am* 52(4):451-479, 2021
55. 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
56. Parke WW: The vascular relations of the upper cervical vertebrae. *Orthop Clin North Am* 9(4):879-889, 1978
57. Patel AJ, Gressot LV, Boatey J, Hwang SW, Brayton A, Jea A: Routine sectioning of the C2 nerve root and ganglion for C1 lateral mass screw placement in children: Surgical and functional outcomes. *Child's Nervous System* 29:93-97, 2013
58. Perez-Orribo L, Kalb S, Snyder LA, Hsu F, Malhotra D, Lefevre RD, Elhadi AM, Newcomb AGUS, Theodore N, Crawford NR: Comparison of CT versus MRI measurements of transverse atlantal ligament integrity in craniovertebral junction injuries. Part 2: A new CT-based alternative for assessing transverse ligament integrity. *J Neurosurg Spine* 24(6):903-909, 2016
59. Pu YM, Tang EY, Yang XD: Trapezius muscle innervation from the spinal accessory nerve and branches of the cervical plexus. *Int J Oral Maxillofac Surg* 37:567-572, 2008
60. Radcliff KE, Hussain MM, Moldavsky M, Klocke N, Vaccaro AR, Albert TJ, Khalil S, Bucklen B: In vitro biomechanics of the craniovertebral junction a sequential sectioning of its stabilizing structures. *Spine J* 15:1618-1628, 2015
61. Roberts DA, Doherty BJ, Heggeness MH: Quantitative anatomy of the occiput and the biomechanics of occipital screw fixation. *Spine (Phila Pa 1976)* 23:1100-1108, 1998
62. Roche CJ, King SJ, Dangerfield PH, Carty HM: The atlanto-axial joint: Physiological range of rotation on MRI and CT. *Clin Radiol* 57: 103-108, 2002
63. Ronnen HR, de Korte PJ, Brink PR, van der Bijl HJ, Tonino AJ, Franke CL: Acute whiplash injury: is there a role for MR imaging?—a prospective study of 100 patients. *Radiology* 201:93-96, 1996
64. Ryniewicz AM, Skrzat J, Ryniewicz A, Ryniewicz W, Walocha J: Geometry of the articular facets of the lateral atlanto-axial joints in the case of occipitalization. *Folia Morphol* 69:147-153, 2010
65. Sakamoto Y: Spatial relationships between the morphologies and innervations of the scalene and anterior vertebral muscles. *Ann Anatomy Anatomischer Anzeiger* 194:381-388, 2012
66. Saldinger P, Dvorak J, Rahn BA, Perren SM: Histology of the alar and transverse ligaments. *Spine (Phila Pa 1976)* 15:257-261, 1990
67. Scali F, Marsili ES, Pontell ME: Anatomical connection between the rectus capitis posterior major and the dura mater. *Spine* 36:E1612-E1614, 2011
68. Schiff DCM, Parke WW: The arterial supply of the odontoid process (dens). *Anat Rec* 172:399-400, 1972
69. Sengül G, Kadioglu HH: Morphometric anatomy of the atlas and axis vertebrae. *Turk Neurosurg* 16:69-7, 2006
70. Shiraishi T, Yato Y: New double-door laminoplasty procedure for the axis to preserve all muscular attachments to the spinous process. *Neurosurg Focus* 12:1-3, 2002
71. Standring S: *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice*, 40<sup>th</sup> ed. London: Churchill Livingstone Elsevier, 2008
72. Theodore N, Aarabi B, Dhall SS, Gelb DE, Hurlbert RJ, Rozzelle CJ, Ryken TC, Walters BC, Hadley MN: Occipital condyle fractures. *Neurosurgery* 72 (Suppl 2):106-113, 2013
73. Tuli S, Tator CH, Fehlings MG, Mackay M: Occipital condyle fractures. *Neurosurgery* 41:368-377, 1997
74. Wanibuchi M, Fukushima T, Zenga F, Friedman AH: Simple identification of the third segment of the extracranial vertebral artery by extreme lateral inferior transcondylar transtuberular exposure (ELITE). *Acta Neurochirurgica* 151:1499-1503, 2009
75. Werne S: Studies in spontaneous atlas dislocation. *Acta Orthop Scand Suppl* 23:1-150, 1957



76. Wolfla CE: Anatomical, biomechanical, and practical considerations in posterior occipitocervical instrumentation. Spine J 6 (6 Suppl):225S–232S, 2006
77. Wong ST, Ernest K, Fan G, Zovickian J, Pang D: Isolated unilateral rupture of the alar ligament. J Neurosurg Pediatr 13:541–547, 2014
78. Zibis AH, Mitrousias V, Baxevanidou K, Hantes M, Karachalios T, Arvanitis D: Anatomical variations of the foramen transversarium in cervical vertebrae: Findings, review of the literature, and clinical significance during cervical spine surgery. Eur Spine J 25:4132-4139, 2016