



Omuz biyomekaniği ve ters omuz protezinin mekaniğe etkisi

Shoulder biomechanics and the effect of reverse shoulder prosthesis on mechanics

Alper Şükrü Kendirci, M. Oğuzhan Albayrak, Ali Erşen

İstanbul Üniversitesi İstanbul Tıp Fakültesi, Ortopedi ve Travmatoloji Ana Bilim Dalı, İstanbul

Omuz, insan vücudundaki biyomekanik açıdan en karmaşık eklemlerden biridir ve geniş bir hareket aralığı ile eklem stabilitesi mükemmel bir uyum hâlinindedir. Bu derleme, omuz hareketliliği için birincil bölge olan glenohumeral eklem odaklanarak omzun temel biyomekanik prensiplerini araştırmaktadır. Hareket sırasında eklem stabilitesinin korunmasında rotator manşet kasları gibi dinamik stabilizatörlerin yanı sıra bağlar ve eklem kapsülü gibi statik stabilizatörlerin rolü tartışılmaktadır. Bu yapıların, humerus başının glenoid içindeki translasyonunu kontrol etmek için nasıl etkileşime girdiğini ve çok çeşitli omuz hareketleri boyunca stabiliteyi nasıl sağladığı incelenmektedir. Ayrıca derleme, rotator manşet yırtıkları ve omuz instabilitesi gibi omuz patolojileriyle ilişkili biyomekanik zorluklar ele alınmakta ve disfonksiyona sebep olan anormal kuvvetler ve translasyonlar vurgulanmaktadır. Ters omuz protezi, baş ve soket konfigürasyonunu tersine çevirerek omzun biyomekaniğini değiştirir, böylece deltoidin mekanik avantajını artırır, ancak aynı zamanda rotasyonel hareketlerde ve stabilite endişelerinde potansiyel sınırlamalar getirir. Makale, omuz biyomekaniğinin anlaşılmasının hem cerrahi hem de rehabilitasyon stratejilerini nasıl geliştirebileceğine ve hareketlilikle stabilite arasındaki hassas dengeyi koruyarak hasta sonuçlarını nasıl optimize edebileceğine dair değerlendirmelerle sona ermektedir.

Anahtar sözcükler: omuz biyomekaniği; glenohumeral eklem; rotator manşet; omuz stabilitesi; ters omuz protezi; omuz patolojisi

The shoulder is one of the most biomechanically complex joints in human body, with a wide range of motion and joint stability in perfect harmony. This article explores the key biomechanical principles of the shoulder, focusing on the glenohumeral joint, the primary site for shoulder mobility. The role of static stabilizers, including ligaments and the joint capsule, alongside dynamic stabilizers like the rotator cuff muscles, is discussed in maintaining joint stability during motion. We examine how these structures interact to control the humeral head's translation within the glenoid, ensuring stability across a wide range of shoulder movements. Additionally, the article delves into the biomechanical challenges associated with shoulder pathologies, such as rotator cuff tears and shoulder instability, highlighting the abnormal forces and translations that contribute to dysfunction. Reverse shoulder prosthesis alters the biomechanics of the shoulder by reversing the ball-and-socket configuration, thereby increasing the deltoid's mechanical advantage but also introducing potential limitations in rotational movements and stability concerns. The article concludes with insights into how an understanding of shoulder biomechanics can inform both surgical and rehabilitation strategies, optimizing patient outcomes by maintaining the delicate balance between mobility and stability.

Key words: shoulder biomechanics; glenohumeral joint; rotator cuff; shoulder stability; reverse shoulder prosthesis; shoulder pathology

Omzun biyomekaniğinde, geniş hareket aralığının yanı sıra stabilite sağlayan mekanizmaların anlaşılması da kritik öneme sahiptir. Hareketlilik ve stabilite arasındaki denge, kaslar, tendonlar, bağlar ve eklem kapsülü dâhil olmak üzere eklem kas-iskelet bileşenleri arasındaki uyumla sağlanır. Öncelikle glenohumeral eklem rolünü ve kasların, bağların ve eklem mimarisinin hareket ve stabilite üzerindeki etkisini

vurgulayarak omuz fonksiyonunu yöneten temel biyomekanik prensiplerden bahsetmek gerekecektir.

HAREKET BİYOMEKANIĞI

Glenohumeral eklem, birçok düzlemde kapsamlı harekete izin veren neredeyse küresel bir mimaride eklem yapısı sergiler. Omzun birincil hareketleri arasında

İletişim / Contact: Prof. Dr. Ali Erşen • **E-posta / E-mail:** ali.ersen@istanbul.edu.tr

ORCID ID: Alper Şükrü Kendirci, 0000-0001-6250-2469 • Oğuzhan Albayrak, 0000-0002-4006-3650 • Ali Erşen, 0000-0001-6241-2586

Geliş / Received: 16 Eylül 2024 • **Revizyon / Revised:** 21 Ekim 2024 • **Kabul / Accepted:** 23 Ekim 2024

fleksiyon, ekstansiyon, abdüksiyon, adduksiyon ve hem iç hem de dış rotasyon yer alır. Humerus başının dışbükey şekli ve nispeten sığ glenoid fossa bu geniş hareket aralığını kolaylaştırırken, yumuşak doku yapıları eklem stabilitesine katkı sağlar.

Glenohumeral Hareket: Abdüksiyon veya fleksiyon gibi omuz elevasyonu sırasında humerus başı minimal süperior-inferior translasyon yapmaktadır. Çalışmalar, kol elevasyonu sırasında superior-inferior translasyonun 0,35 milimetre (mm)'den az olduğunu, anterior-posterior translasyonun ise fleksiyonda 3,8 mm'den, ekstansiyonda 4,9 mm'ye kadar değişebildiğini göstermiştir.^[1] Aşırı translasyon omuz instabilitesi veya rotator manşet yırtıkları gibi patolojik durumlara işaret edebileceğinden, bu translasyon dengesi hareket sırasında stabilitenin korunmasında kritik öneme sahiptir.

Rotator Manşetin Omuz Hareketindeki Rolü: Rotator manşet kasları hareket sırasında humerus başını glenoid fossa içinde stabilize ederek omuz biyomekaniğinde önemli bir rol oynar. Bu kaslar humerus başı üzerinde kompresif bir kuvvet oluşturarak abdüksiyon sırasında deltoid gibi daha büyük kaslar tarafından üretilen kuvvetlere karşı antagonist etki gösterir.^[2] Deltoid ve rotator manşet kasları arasındaki kuvvet çifti kavramı, deltoid kolu abdüksiyona getirirken rotator manşetin humerus başını baskılayarak superior translasyonu önlemesini sağlar.^[3]

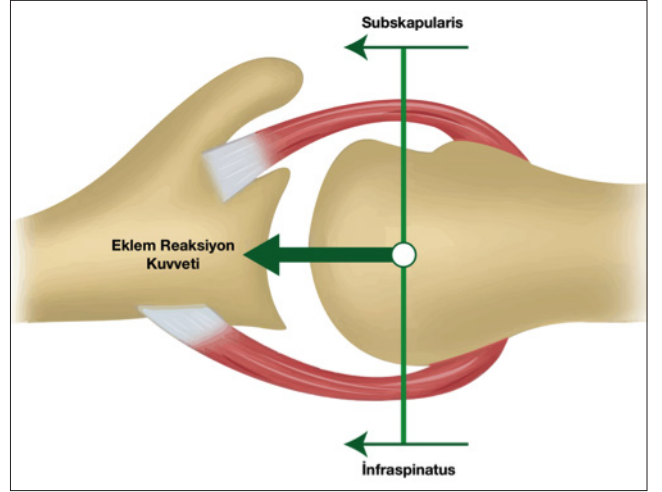
Frontal düzlemde, deltoid ve supraspinatus elevatör olarak çalışırken, rotator manşetin alt lifleri (subskapularis, infraspinatus ve teres minör) depresör olarak işlev görür. Bu kuvvet çifti, dinamik hareketler sırasında humerus başının glenoid içindeki konumunu korumak için gereklidir. Aksiyel düzlemde ise anterior-posterior stabilite ve yine humerus başının glenoid kavitede stabilizasyonu için subskapularis ile infraspinatus ve teres minör kasları işlev görerek kuvvet çiftlerini oluşturur (Şekil 1).^[3]

OMUZDAKİ STABİLİTE MEKANİZMALARI

Omuz eklemi, hareket sırasında eklem uyumunu korumak için hem statik hem de dinamik stabilizatörlere dayanır. Statik stabilizatörler eklem kapsülü, bağlar ve negatif eklem içi basıncı içerirken, dinamik stabilizatörler kaslardan, özellikle de rotator manşetten oluşur.^[1]

Ligamentöz ve Kapsüler Etkiler

Glenohumeral bağlar (superior, orta ve inferior) omuz eklemine çeşitli pozisyonlarında stabilite sağlar. Inferior glenohumeral ligament, özellikle de anterior bantı, kol abdüksiyonda ve dış rotasyonda anterior dislokasyonun önlenmesinde önemli bir rol oynar. Anterior bant, humerus başının inferior translasyonunu önler. Anterior bant, humerus başının inferior translasyonunu önler. Anterior bant, humerus başının inferior translasyonunu önler.



Şekil 1. Omuzda kuvvet çifti kavramı, subskapularise karşı infraspinatus ve teres minörün antagonistik etkisi.

ona karşı birincil stabilizatördür. Tersine, inferior glenohumeral bağın posterior bantı iç rotasyonda posterior translasyonu önler. Korakohumeral ligament de özellikle kol adduksiyondayken humerus başının inferior translasyonuna direnç göstermede rol oynar. Bu bağ dış rotasyon sırasında sıkılaşıp rotasyonel hareketler sırasında omuz stabilitesine katkıda bulunur.^[3]

Glenoid Konkavite ve Labrum: Glenoid fossanın içbükeyliği, humerus başını ortalayarak pasif bir stabilize edici etki sağlar ve ön-arka yöne göre üst-alt yönde daha derin bir içbükeyliğe sahiptir. Glenoidi çevreleyen fibrokartilajöz bir yapı olan labrum, glenoid boşluğunun derinliğini %50 oranında arttırarak eklem stabilitesini daha da arttırır.^[4] Labral yırtık veya ayrılmalarda olduğu gibi labrumun kaybı, omuzun stabilitesini önemli ölçüde azaltarak çıkık riskinin artmasına neden olur.

Kasların Biyomekanikteki Rolü

Kaslar sadece hareket üretmekle kalmaz, aynı zamanda omuzun dinamik stabilizasyonunu da sağlar.

Deltoid ve rotator manşet etkileşimi: Deltoid kası güçlü bir abdüktördür, ancak rotator manşetin antagonist kuvvetleri olmadan humerus başının yukarı doğru migrasyonuna neden olur.^[2] Rotator manşet kasları, özellikle supraspinatus, infraspinatus ve teres minör, depresör olarak çalışır ve kolun yukarı kaldırılması sırasında bu istenmeyen yukarı göçü önlemeye yardımcı olur.

Skapular katkılar: Skapular hareket, özellikle de skapulotorasik hareket, glenohumeral hareketliliğin arttırılmasında hayati bir rol oynar. Omuz elevasyonu sırasında skapula yukarı rotasyon, posterior tilt ve dış rotasyon pozisyonuna gelerek subakromiyal boşluğun genişlemesini sağlar ve sıkışma olasılığını azaltır.^[5] Koordineli

skapulotorasik hareket, glenohumeral eklemin işlevini optimize etmek için kritik öneme sahiptir.

Biceps ve triseps kasları: Bicepsin uzun başı, özellikle fleksiyon sırasında humerus başını glenoide doğru komprese ederek glenohumeral eklemin dinamik bir stabilizatörü olarak görev yapar.^[6] Ek olarak, triseps, özellikle de uzun başı, humerus başının öne veya aşağı translasyonunu önleyerek ekstansiyon ve adduksiyona yardımcı olur, eklem stabilitesine katkıda bulunur.^[7]

TERS OMUZ PROTEZİNİN BİYOMEKANIĞE ETKİSİ

Tarihsel olarak ters omuz protezi (TOP), rotator manşet tarafından sağlanan dinamik kompresyonun kaybı parsiyel protez ve total anatomik omuz protezinde instabiliteye veya erken glenoid komponentin gevşemesine yol açtığından, masif rotator manşet yırtığı mevcut omuzlardaki osteoartriti engellemek için geliştirilmiştir.^[8] Ters baş ve soketten oluşan Grammont tipi TOP 1985 yılında ilk defa yayınlanmıştır. Medialize eklem rotasyon merkezi (ERM), distalize humerus ve sabit bir rotasyon merkezine sahip yarı kısıtlı bir tasarımla omuz biyomekaniğinin taklit edilmesi amaçlanmıştır.^[9] Eklem rotasyon merkezi humerus başının içinde yer aldığı için humerus başının kendi etrafında dönme hareketi yaptığı anatomik protezin aksine, TOP'deki sabit ERM glenosferin içinde yer alır ve humerusa bir menteşe ile glenoide bağlıymış gibi hareket sağlayarak sıkışmaya yatkın hâle getirir. Bu durumun sonucu olarak eklem hareket açıklığı (EHA) sınırlanır.^[10]

Kas Yapısına Etkisi

Fizyolojik omuz anatomisinde yukarıda bahsedilen değişiklikler, deltoid kaldıraç kolunda %42'lik bir artış ve abduksiyonu gerçekleştirmek için anterior deltoid kas liflerinin daha fazla kullanılmasını sağlar.^[11] 155° açılı anatomik olmayan stemli orijinal tasarım ise humerusun distalizasyonu ile deltoidin kaldıraç kolunu anterior deltoid, fleksiyon ve abduksiyon moment kollarına art arda önemli katkılarda bulunarak daha da güçlendirir. Anterior deltoidin defisiti durumunda ise abduksiyon için telafi, subskapularis (%195) ve orta deltoidin (%26) kuvvet artışıyla sağlanır.^[12]

Bahsettiğimiz kazanımların yanında fizyolojik moment kollarının bu modifikasyonlarının dezavantajları da mevcuttur. Anterior ve posterior deltoidle pektoralis majör ek fleksör ve abduktörler olarak çalışırken latissimus dorsi, teres majör ve pektoralis majörün alt kısmının adduktör ve ekstansör moment kolları artar, bu nedenle aktif iç ve dış rotasyona katılımları sınırlanır.^[13] Humeral medializasyon ile anterior ve posterior rotator manşetin moment kollarının azalmış olması, aktif iç ve dış rotas-

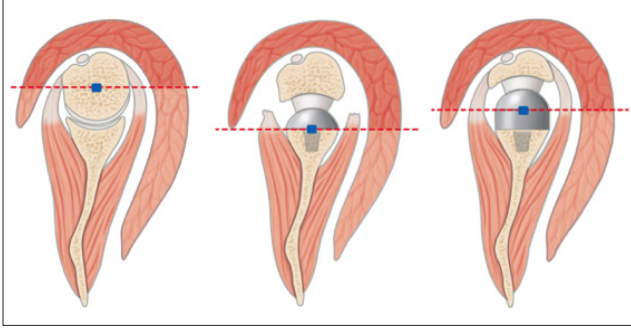
yonun daha da zayıflamasına neden olur.^[14] Bu sorun defisiti gidermek amaçlı bir tendon transferi eklenerek veya mevcut sistem lateralize hâle getirilerek giderilme-ye çalışılabilir. Lateralizasyon ile subskapularis ve teres minörün rotasyonel moment kollarını korunacak ve dolayısıyla aksiyel düzlemde aktif hareket açıklığını artıracaktır.^[15] Ameliyat sonrası hareket açıklığı primer olarak glenohumeral eklemden gerçekleşirken, skapulotorasik katılım TOP'den sonra önemli ölçüde artmaktadır.^[16]

Eklem Rotasyon Merkezindeki Değişiklikler

Medialize bir ERM'nin biyomekanik faydası, rotasyonel kuvvetlerini kemik-glenosfer arayüzü boyunca kompresif kuvvetlere dönüştürmek ve bu sayede stabilizasyon artışı sağlamaktır.^[17] Kompresif kuvvetleri sağlayan rotator manşet kasları bulunmaması nedeniyle yaşanan stabilizasyon kaybı, sabit ERM'nin deltoidin kompanse etmesine ve eklemi stabilize etmek için gerekli kompresyonu sağlamasına izin vermesiyle giderilir. Anatomik protezde eklem reaksiyon kuvvetleri 90° abduksiyonda vücut ağırlığının %90'ına kadar ulaşabilirken, TOP hem kompresif hem de makaslama kuvvetlerini ve dolayısıyla eklem reaksiyon kuvvetlerini %42'ye kadar azaltır. Bu da rotator manşet defisiti olan bir omuzda deltoid aktivite-sinde %20 azalma ile aktif abduksiyona izin verir.^[18]

Medializasyon, skapular çentiklenme olarak tanımlanan skapular boyun ve humeral protez bileşeni arasında sıkışma şeklinde bir dezavantaj yaratır. Glenosferin inferior glenoid kenarın altına yerleştirilmesi veya inferior eksantrik glenosfer kullanılması ile çentiklenmenin önüne geçilebilir. De Wilde ve ark. 5 mm'lik bir *overhang* ile sıkışma olmaksızın addüksiyonun 39° iyileştirebileceğini bildirmiştir.^[19] Ayrıca abduksiyonun akromiyohumeral mesafeyle pozitif korelasyon gösterdiği de bildirilmiştir (r= 0,93; p< 0,001) ve eksantrik glenosfer kullanılarak bu mesafe de arttırılabilir.^[20] Glenoide göre ideal *overhang* miktarı literatürde yaklaşık 2,5 mm olarak gösterilmiştir.^[21] Simülasyonlarda hareket aralığını arttırdığı gösterilen protez tasarımındaki en etkili değişiklik ise boyun-şaft açısının 155°'den daha anatomik bir açıya doğru değiştirilmesidir.^[22]

Eklem rotasyon merkezi, anatomik ERM'ye göre medialize edilmesi gerekirken, glenosferin glenoidden bir miktar lateralizasyonu, kemik-implant arayüzünde makaslama kuvvetlerinin üstesinden geldiği düşünülen kompresif kuvvetleri daha da arttırabilir (Şekil 2).^[17] Biyomekanik çalışmalarda lateralizasyonun tüm yönlerde eklem hareket açıklığını arttırdığı gösterilmiştir.^[23] Lateralizasyonun akromiyal stres kırığı riski üzerindeki etkisine ilişkin süregelen bir tartışma vardır. Klinik çalışmalarda akromiyon stres kırığında distalizasyonun lateralizasyondan daha fazla etkisi olduğu gösterilmiştir.^[24]



Şekil 2. Ters omuz protezinde eklem rotasyon merkezi medializasyonu ve implant lateralizasyonu.

Stabilite Üzerindeki Etkileri

Rotator manşetin stabilize edici etkisi, masif yırtık olan bir omuzda yoktur ve bu da omzu instabiliteye yatkın hâle getirir. Fizyolojik durumda, glenoid humerus başı için bir sütun görevi görür. Omuz hareket açıklığı sırasında, kombine fizyolojik glenohumeral ve skapulohumeral hareket bu sütunu humerus başının altında tutar. Rotator manşet yırtığı artropatisi durumunda değişen kas dengesi kuvvetleri bu dinamik süreci bozar ve manşet yırtığı artropatisinde karşılaşılan eksantrik aşınma modelini açıklar. Humerus başı yukarı doğru göç edip akromiyonun asetabularizasyonunu oluşturarak dinamik instabilitenin nötralize edilmesini sağladığında son noktaya ulaşılır.^[25]

İnstabilite, TOP sonrası en çok atıfta bulunulan komplikasyonlardan biridir. Glenosfer, humeral soket derinliği, humeral stem versiyonu, humeral lateralizasyon ve uzunluk ile kalan subskapularis dâhil olmak üzere çok çeşitli aktörler stabiliteyi potansiyel olarak etkiler. İnstabiliteye en yatkın kol pozisyonu, nötral veya iç rotasyon ile 30° abdüksiyondur. Glenosfer çapının 38 mm'den 42 mm'ye çıkarılmasının, eklem yükünü ve deltoid kuvvetini artırarak stabiliteyi %32 oranında arttırdığı bildirilmiştir.^[26] Glenosfer konumlandırılmasında 2 mm'lik bir inferior ofsetin stabiliteyi %17 oranında arttırdığı gösterilmiştir ve bunun da stabiliteyi arttıran bir faktör olduğu unutulmamalıdır.^[27] Biyomekanik veriler ayrıca superior tiltin hastaları daha yüksek instabilite riskine maruz bıraktığını göstermektedir.^[28] Glenosfer lateralizasyonu, kol adduksiyondayken skapular sıkışmayı önlemek ve anterior dislokasyon için gereken kuvveti arttırmada etkilidir, ancak kolu abdüksiyona getirmek için azaltılmış deltoid kuvvetinin biyomekanik faydası maalesef kaybolur. Humerus boyun-şaft açısının (135°/155°) karşılaştırılması, 30° abdüksiyonda 135°'lik stemlerde daha yüksek dislokasyon kuvvetleriyle sadece küçük bir fayda ortaya çıkarmıştır; ancak bu etki 6-9 mm glenoid lateralizasyonuna kıyasla ihmal edilebilir düzeydedir.^[29] Aşırı humeral retrotorsiyondan (>10°) kaçınmanın stabilite üzerinde

glenosfer retroversiyonundan (>20°) daha yüksek bir etkiye sahip olduğu da gösterilmiştir.^[30] Son olarak, glenosfer çapına oranla tanımlanan humeral soket derinliğinin, hareket aralığının azalması pahasına stabiliteyi arttırdığı unutulmamalıdır.^[31]

Humerus Distalizasyonun Etkisi

Humerusun distalizasyonu, deltoidin kaldıraç kolunu arttırmak ve fonksiyonel sonuçları iyileştirmek TOP'de başlıca hedef olsa da uzatmanın doğurduğu birtakım sonuçlar mevcuttur. Optimal uzatmanın 2 santimetre (cm) civarında olduğu düşünülmeyle birlikte bu konu hâlâ tartışılmaktadır.^[32] Yetersiz uzatmanın (özellikle revizyon cerrahisinde) eklem instabilitesi açısından kritik bir faktör olduğu biliniyor olsa da aşırı uzatmanın dezavantajları arasında nörolojik problem riskini arttırması ve eklem hareket açıklığının azalmasının yanı sıra eklem reaksiyon kuvvetlerinin artmasına neden olan aşırı gerilme yer almaktadır.^[33] Ayrıca, onlay humeral komponent ile uzatma, inlay komponentlere kıyasla artmış akromiyal stres kırığı riski ile ilişkilendirilmiştir.^[24] Komplikasyonlardan kaçınırken yumuşak doku gerilimini arttırmanın en uygun yolu konusunda mevcut bir fikir birliği olmasa da son biyomekanik çalışmalar, humerus lateralizasyonunun eklem ve kas yükünü iyileştirmek için potansiyel bir çözüm olabileceğini göstermektedir.^[34,35] Ancak, humeral lateralizasyonun aynı zamanda distalizasyona yol açtığı unutulmamalıdır. Yukarıda bahsedilen sonuçlara ek olarak, distalizasyon kalan rotator manşetin kuvvet vektörlerini de değiştirir.

SONUÇ

Omzun biyomekaniği, geniş bir hareket aralığı sağlamak ve eklem stabilitesini korumak arasında hassas bir denge içerir. Bu denge, kaslar, tendonlar, bağlar ve eklem kapsülü dâhil olmak üzere çeşitli kas-iskelet bileşenlerinin koordineli işlevi ile sağlanır. Özellikle glenohumeral eklem, çevresindeki kaslar ve bağlar tarafından desteklenerek omuz biyomekaniğinde merkezi bir rol oynar. Bu biyomekanik prensipleri anlamak, özellikle rotator manşet yırtıkları veya omuz instabilitesi gibi karmaşık durumları içeren vakalarda omuz patolojilerini teşhis etmek ve etkili tedavi stratejileri uygulamak için çok önemlidir.

Ters omuz protezi, masif rotator manşet yırtığı veya rotator manşet yırtığı artropatisi olan hastalarda sıklıkla görülen rotator manşet fonksiyon kaybını telafi eden benzersiz bir biyomekanik model sunar. Ters omuz protezi, baş ve soket konfigürasyonunu tersine çevirerek rotasyon merkezini medialize eder ve deltoidin mekanik avantajını arttırarak, kolun elevasyonunda daha büyük bir rol üstlenmesini sağlar. Ancak bu değişen biyomekanik, rotasyonel hareketlerde sınırlamalara neden olabilir

ve skapular çentiklenme veya instabilite gibi komplikasyonlara yol açabilir. Bu zorlukları hafifletmek için, glenosferin lateralizasyonu gibi implant tasarımındaki değişiklikler stabiliteyi artırabilir ve skapular sıkışma gibi komplikasyonları azaltabilir.

Ters omuz protezinin etkileri de dâhil olmak üzere omuz fonksiyonuna ilişkin biyomekanik çalışmalardan elde edilen bilgiler hem cerrahi hem de rehabilitasyon yaklaşımlarının iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır. Bu, omuz eklemine benzersiz stabilite beklentisini ele alırken hareketliliği de koruyarak hasta sonuçlarını optimize eder. Bu karmaşık etkileşimleri anlamak, omuz patolojilerinin başarılı bir şekilde yönetilmesini ve tedavi edilmesini sağlamanın anahtarıdır.

KAYNAKLAR

- Halder AM, Itoi E, An KN. Anatomy and biomechanics of the shoulder. *Orthop Clin North Am* [Internet] 2000;31(2):159-76. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030589805701383>. **Crossref**
- Nakano S, Okada H, Nakamura K, Kitagawa K, Wada C. Effects of electrical stimulation of antagonist muscles on shoulder joint adduction force and grip strength. *J Phys Ther Sci* 2024;36(7):378-81. **Crossref**
- Goetti P, Denard PJ, Collin P, Ibrahim M, Hoffmeyer P, Lädermann A. Shoulder biomechanics in normal and selected pathological conditions. *EFORT Open Rev* 2020;5(8):508-18. **Crossref**
- Halder AM, Kuhl SG, Zobitz ME, Larson D, An K-N. Effects of the glenoid labrum and glenohumeral abduction on stability of the shoulder joint through concavity-compression: An in vitro study. *JBS* 2001;83(7):1062-9. **Crossref**
- Struyf F, Nijs J, Baeyens J, Mottram S, Meeusen R. Scapular positioning and movement in unimpaired shoulders, shoulder impingement syndrome, and glenohumeral instability. *Scand J Med Sci Sports* 2011;21(3):352-8. **Crossref**
- Elser F, Braun S, Dewing CB, Giphart JE, Millett PJ. Anatomy, function, injuries, and treatment of the long head of the biceps brachii tendon. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2011;27(4):581-92. **Crossref**
- Buckley JP, Kerwin DG. The role of the biceps and triceps brachii during tennis serving. *Ergonomics* 1988;31(11):1621-9. **Crossref**
- Mahony GT, Werner BC, Chang B. Risk factors for failing to achieve improvement after anatomic total shoulder arthroplasty for glenohumeral osteoarthritis. *J Shoulder Elb Surg* 2018;27:968-75. **Crossref**
- Grammont PM, Trouilloud P, Latfay J, Deries X. Etude et réalisation d'une nouvelle prothèse d'épaule. *Rhumatologie* 1987;39:407-18.
- Middernacht B, Van Tongel A, De Wilde L. A critical review on prosthetic features available for reversed total shoulder arthroplasty. *BioMed Res Int* 2016;2016:3256931. **Crossref**
- Kontaxis A, Johnson GR. The biomechanics of reverse anatomy shoulder replacement: A modelling study. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2009;24:254-60. **Crossref**
- Gulotta LV, Choi D, Marinello P. Anterior deltoid deficiency in reverse total shoulder replacement: A biomechanical study with cadavers. *J Bone Jt Surg [Br]*. 2012;94-B:1666-9. **Crossref**
- Ackland DC, Richardson M, Pandy MG. Axial rotation moment arms of the shoulder musculature after reverse total shoulder arthroplasty. *J Bone Jt Surg [Am]* 2012;94-A:1886-95. **Crossref**
- Herrmann S, König C, Heller M, Perka C, Greiner S. Reverse shoulder arthroplasty leads to significant biomechanical changes in the remaining rotator cuff. *J Orthop Surg Res*. 2011;6:42. **Crossref**
- Greiner S, Schmidt C, König C, Perka C, Herrmann S. Lateralized reverse shoulder arthroplasty maintains rotational function of the remaining rotator cuff. *Clin Orthop Relat Res* 2013;471:940-6. **Crossref**
- Kwon YW, Pinto VJ, Yoon J, Frankle MA, Dunning PE, Sheikhzadeh A. Kinematic analysis of dynamic shoulder motion in patients with reverse total shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elb Surg* 2012;21:1184-90. **Crossref**
- Harman M, Frankle M, Vasey M, Banks S. Initial glenoid component fixation in 'reverse' total shoulder arthroplasty: A biomechanical evaluation. *J Shoulder Elb Surg* 2005;14:162S-167S. **Crossref**
- Rugg CM, Coughlan MJ, Lansdown DA. Reverse total shoulder arthroplasty: Biomechanics and indications. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2019;12:542-53. **Crossref**
- De Wilde LF, Poncet D, Middernacht B, Ekelund A. Prosthetic overhang is the most effective way to prevent scapular conflict in a reverse total shoulder prosthesis. *Acta Orthop* 2010;81:719-26. **Crossref**
- Lädermann A, Denard PJ, Collin P. Effect of humeral stem and glenosphere designs on range of motion and muscle length in reverse shoulder arthroplasty. *Int Orthop* 2020;44:519-30. **Crossref**
- Haidamous G, Lädermann A, Hartzler RU. Radiographic parameters associated with excellent versus poor range of motion outcomes following reverse shoulder arthroplasty. *Shoulder Elb* 2020;9:1758573220936234. **Crossref**
- Lädermann A, Denard PJ, Boileau P. Effect of humeral stem design on humeral position and range of motion in reverse shoulder arthroplasty. *Int Orthop* 2015;39:2205-13. **Crossref**
- Lädermann A, Tay E, Collin P. Effect of critical shoulder angle, glenoid lateralization, and humeral inclination on range of movement in reverse shoulder arthroplasty. *Bone Jt Res* 2019;8:378-86. **Crossref**
- Haidamous G, Lädermann A, Frankle MA, Gorman RA, Denard PJ. The risk of postoperative scapular spine fracture following reverse shoulder arthroplasty is increased with an onlay humeral stem. *J Shoulder Elb Surg* 2020;29:2556-63. **Crossref**
- Walker M, Brooks J, Willis M, Frankle M. How reverse shoulder arthroplasty works. *Clin Orthop Relat Res* 2011;469:2440-51. **Crossref**
- Ackland DC, Robinson DL, Wilkosz A. The influence of rotator cuff tears on muscle and joint-contact loading after reverse total shoulder arthroplasty. *J Orthop Res* 2019;37:211-9. **Crossref**

27. Clouthier AL, Hetzler MA, Fedorak G, Bryant JT, Deluzio KJ, Bicknell RT. Factors affecting the stability of reverse shoulder arthroplasty: A biomechanical study. *J Shoulder Elb Surg* 2013;22:439-44. **Crossref**
28. Gutiérrez S, Greiwe RM, Frankle MA, Siegal S, Lee WE. Biomechanical comparison of component position and hardware failure in the reverse shoulder prosthesis. *J Shoulder Elb Surg* 2007;9-12. **Crossref**
29. Ferle M, Pastor MF, Hagenah J, Hurschler C, Smith T. Effect of the humeral neck-shaft angle and glenosphere lateralization on stability of reverse shoulder arthroplasty: A cadaveric study. *J Shoulder Elb Surg* 2019;28:966-73. **Crossref**
30. Favre P, Sussmann PS, Gerber C. The effect of component positioning on intrinsic stability of the reverse shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elb Surg* 2010;19:550-6. **Crossref**
31. Abdulla I, Langohr DG, Giles JW, Johnson JA, Athwal GS. The effect of humeral polyethylene insert constraint on reverse shoulder arthroplasty biomechanics. *Shoulder Elb* 2018;10:25-31. **Crossref**
32. Lädermann A, Williams MD, Melis B, Hoffmeyer P, Walch G. Objective evaluation of lengthening in reverse shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elb Surg* 2009;18:588-95. **Crossref**
33. Tashjian RZ, Burks RT, Zhang Y, Henninger HB. Reverse total shoulder arthroplasty: A biomechanical evaluation of humeral and glenosphere hardware configuration. *J Shoulder Elb Surg* 2015;24-77. **Crossref**
34. Liou W, Yang Y, Petersen-Fitts GR, Lombardo DJ, Stine S, Sabesan VJ. Effect of lateralized design on muscle and joint reaction forces for reverse shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elb Surg* 2017;26:564-72. **Crossref**
35. Hamilton MA, Diep P, Roche C. Effect of reverse shoulder design philosophy on muscle moment arms. *J Orthop Res* 2015;33:605-13. **Crossref**