

İskelet Kaslarının Yapısı ve Biyomekaniği

Kasım SERBEST^{1*}, Osman ELDOĞAN¹

¹Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü

Özet

Ülkemizde biyomekanik ve biyomedikal mühendisliği alanında yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Bu alandaki araştırmacıların ilgisini çeken konulardan biri de iskelet kaslarıdır. Ancak iskelet kaslarının mekanik özelliklerinin tartışıldığı Türkçe kaynak bulmak son derece güçtür. Bu çalışmada, güncel ve temel yayınlardan yararlanılarak iskelet kaslarının makro ve mikro yapıları tanıtılmış ve biyomekanik özellikleri tartışılmıştır. İlave olarak, kasların mekanik özelliklerinin anlaşılmasında büyük öneme sahip olan Elektromiyografi (EMG) işaretleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İskelet kasları, kas kasılması, kas mekaniği, EMG

Biomechanics and Structure of Skeletal Muscles

Kasım SERBEST^{1*}, Osman ELDOĞAN¹

¹Sakarya University, Faculty of Technology, Department of Mechatronics Engineering

Abstract

The studies in biomechanics and biomedical engineering are increasing in our country. One of the issues interested by researchers is the skeletal muscle. However, it is extremely difficult to find a source which is discussed mechanical properties of skeletal muscle in Turkish. In this study, macro and micro structure of skeletal muscle have been introduced and discussed biomechanics properties using actual and fundamental publications. Additionally, it has been given information about Electromyography (EMG) signals which are being major importance to understand the mechanical properties of the muscles.

Keywords: Skeletal muscle, muscle contraction, muscle mechanics, EMG

1. Giriş

Ülkemizde biyomekanik ve biyomedikal alanında yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Bu alanlarda çalışan araştırmacıların ilgisini çeken konulardan biri iskelet kaslarının biyomekaniğidir. Ancak konuyla ilgili Türkçe yayın bulmak çok zordur. İskelet kaslarına yönelik çalışmalar genellikle tıp literatüründe karşımıza çıkmaktadır. Canlılığı tanımlayan “biyo-” ön ekinin peşinden gelen diğer terimlerden anlaşıldığı gibi bu alan disiplinler arası çalışmalar içermektedir. Kaslar, kimyasal enerjiyi mekanik (kinetik) enerjiye ve ısı enerjisine çeviren biyokimyasal makinelerdir [1]. İnsan vücudunun en büyük tek (bütün) dokusu olan kas, doğumda vücut kütlelerinin %25’den biraz azını, genç erişkinlikte %40’dan fazlasını ve yaşlı erişkinlikte %30’dan biraz azını oluşturur [2]. İnsan vücudundaki kas sistemi, kalbi oluşturan kalp kası (kardiyak kaslar), iç organlardaki düz (beyaz)

kaslar ve iskelete tendonlar yardımıyla bağlanan çizgili (kırmızı veya iskelet) kaslardan meydana gelmektedir [3].

Genellikle mide, bağırsak gibi içi boş organların ve damarların yapısında bulunan düz kaslar istemsiz olarak kasılırlar ve çizgili kaslardakine benzer molekül yapısına sahip olmakla birlikte, sarkomerleri bunlara çizgili bir görünüm verecek şekilde sıralanmamıştır [2]. Kalp kası, yapı ve kasılma mekanizması olarak çizgili kaslara benzemektedir; ancak istemsiz bir şekilde ve ritmik olarak çalışmaktadır [4]. Diğer kaslara uyarı beyinden gelen sinirlerle iletilirken kalp kası kendi uyarısını oluşturur, çalışma frekansı (nabız) bilgisini ise beyinden alır.

Bu çalışmada iskelet kaslarının yapısından ve kasılma mekanizmasından bahsedilmiştir. Ayrıca

*Sorumlu yazar: Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 54187, Sakarya, Türkiye E-mail: kserbest@sakarya.edu.tr, Tel: +902642956538 Fax: +902642956424

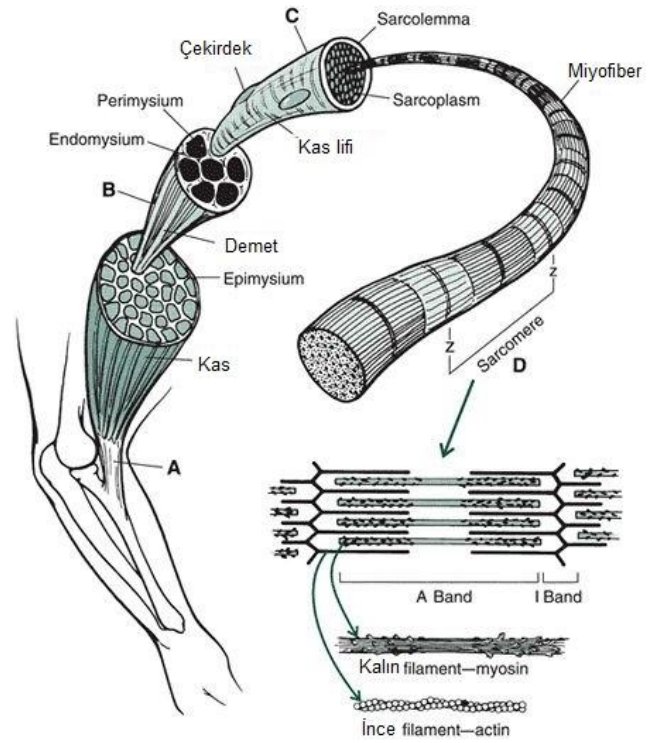
kasların mekanik özellikleri, yapısal özellikleri ile ilişkilendirilerek tartışılmıştır. Bu amaçla, Web of Science, Proquest, Scopus ve Medline veri tabanları taranarak ve bu alanda yazılmış kitaplar incelenerek elde edilen bilgiler paylaşılmıştır.

2. İskelet Kaslarının Bileşimi

Vücudun sağ ve sol taraflarında çift şekilde 430'dan fazla iskelet kası vardır. En zorlayıcı hareketler bile 80 çiftten daha azlık bir kısım tarafından üretilir. Kaslar sağlamlık sağlar ve iskeleti yıkıcı darbelerden korurlar, sarsıntıyı sönümlerler, kemiklerin eklemlerle birlikte hareketini sağlarlar ve yüklerle karşı vücut duruşunun korunmasına yardımcı olurlar. Bu özellikler genellikle tek bir kastan ziyade grup halinde çalışan kaslar sayesinde ortaya konur.

Kas işlevlerinin biyomekaniğini anlayabilmek için kas ve tendon (kiriş) birimlerinin anatomik yapısının, özelliklerinin ve kas liflerinin kimyasal yapısının bilinmesi gerekir. İskelet kaslarının anatomik yapısı Şekil 1'de görülmektedir. İskelet kaslarının lif yapısı, yüzlerce uzun silindirik hücre çekirdeğinden oluşmaktadır. Kas lifleri 10 – 100 µm kalınlığında ve yaklaşık 1 – 30 cm uzunluğundadır. Bir kas lifi çok sayıda miyofiberden meydana gelmektedir. Miyofiberler plazma zar tarafından sarılı sarkolemma içindedir. Sarkolemma, vinsülin ve distrofin üzerinden ekstra miyofiberli hücre iskeletinin bir parçası olan sarkometrik Z çizgilerine bağlanır. Miyofiberler; ince (aktin), kalın (miyosin), esnek (titin) ve esnek olmayan (nebulin) filamanlar içeren birkaç sarkomerden meydana gelir. Her lif endomsiyum adı verilen doku ile çevrilidir ve lifler, demet veya salkım halindedirler. Kaslar birkaç demetin bir araya gelmesiyle oluşurlar ve epimsiyum denilen bağlayıcı doku ile çevrilidirler. Genel olarak her kasın bitim noktası, aktif kasılma özelliği olmayan tendonlar ile kemiğe bağlanır. Kaslar kasılabilen yapıdadır, tendonlar ise esnek özellikli gruplar şeklindedir. Epimsiyum ve perimsiyum içindeki kollajen lifler tendonlar boyunca devam ederler ve bu lifler, kemik ve kas lifleri için ana yapı görevi görürler. Epimsiyum, perimsiyum, endomsiyum ve sarkolemma paralel esnek bir parça olarak görev yaparlar. Kasların kasılması sonucu oluşan kuvvet, bu bağlayıcı dokular ve tendonlar sayesinde kemiklere iletilir [3-6].

Her kas lifi, miyofiber denilen hassas tellerden meydana gelir. Bunların yapıları ve görevleri ışık mikroskobu ve elektron mikroskobu ile detaylı olarak incelenmiştir. Dokularının kimyasal özellikleri ve biyokimyasaları önceki çalışmalar ile açıklanmıştır [7, 8].



Şekil 1: İskelet kaslarının yapısı [6].

A. Her kas tendonlar aracılığıyla kemiğe bağlanır. B. Kas demetleri içindeki lifler. C. Her lif, miyofiberlerden meydana gelmektedir. D. Gerçek kasılma birimi sarkomerdir. Kas kısalması sarkomerdeki aktin ve miyosinin kayma hareketiyle meydana gelir.

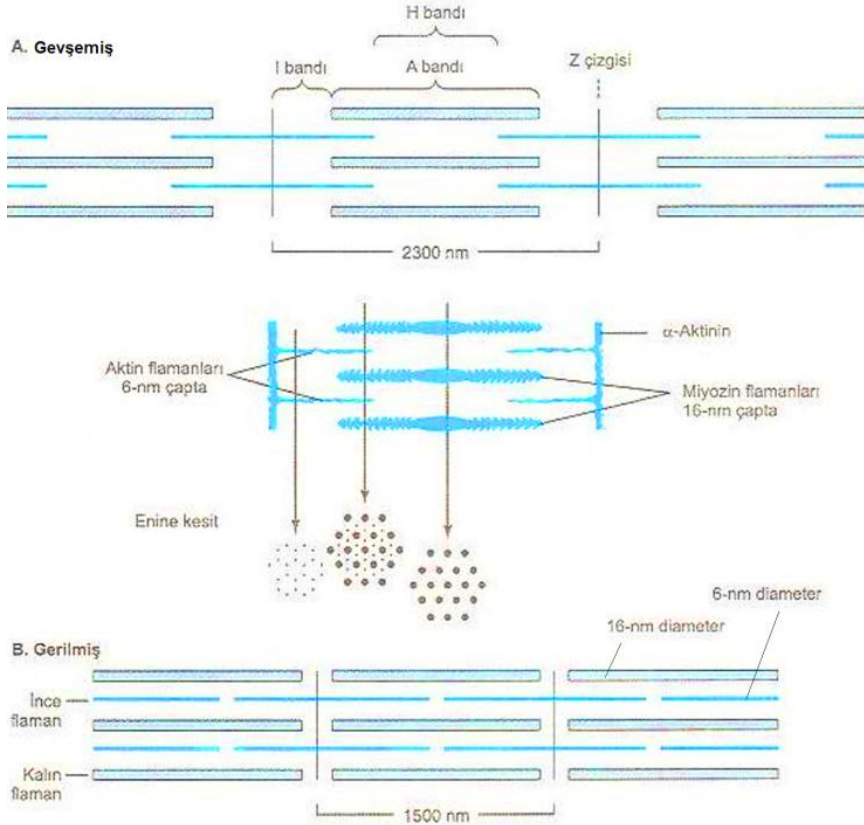
Aktin ve miyosin, miyofiberlerin kasılan bölümüdür, titin ve nebulin ise miyofiber hücrelerinin bir parçasıdır. Miyofiberler kasılmanın ana elemanlarıdır. İnce liflerin ana bileşeni olan aktin, çift helis şeklindedir ve birbirlerinin etrafına sarılı iplikler gibi görünür. İki ilave protein olan troponin ve tropomiyosin, aktin helisin oluşumunda yer alan iki önemli bileşendir. Bu iki protein kasılma esnasında aktin ve miyosin lifleri arasındaki ayrılmayı düzenler.

3. Kas Kasılmasının Moleküler Temelleri

Kas kasılmasıyla ilgili en yaygın teori, aynı anda Huxley kardeşler tarafından 1964 yılında önerilen ve daha sonra yeniden düzenlenen kayan lifler teorisidir. Bu teoriye göre sarkomerin ve dolayısıyla kasın aktif kısalması, aktin ve miyosin liflerinin orijinal uzunluğunu korurken birinden diğerine geçmesi şeklinde oluşur. Kasılma kuvveti, miyosin başları veya çapraz bağ tarafından aktin ve miyosinin üst üste geldiği bölgede (A bandı) üretilir [9, 10].

Aktin liflerle temas halindeki çapraz bağlardaki bu hareket, aktin liflerinin sarkomerin merkezine doğru kaymasıyla oluşur. Sarkomerlerin seğirme olarak adlandırılan eş zamanlı kısılması ile kas lifleri kasılmış olur. Çapraz bağın (miyosin başı ile aktin arasındaki bağ) tek bir hareketinde, aktin lifler miyosin liflere oranla çok küçük bir yer değiştirme yaparlar. Her çapraz bağ, aktin lifler üzerinden kendini bir reseptörden ayırır ve uzaktaki diğer bir reseptöre tekrar bağlar. Çapraz bağ, senkronize

şekilde hareket etmez, her bir hareket birbirinden bağımsızdır. Böylece aktif çapraz bağların yarısındaki herhangi bir moment, kuvvet ve yer değiştirme meydana getirir ve ayrılma gerçekleştiğinde diğer bağlar kısılmanın devam etmesini sağlar. Bu kısılma, I bandı ve H bölgesinin küçülmesi şeklinde sarkomerlere aksettirilir. Bu esnada Z çizgileri birbirlerine doğru hareket eder ve A bandının genişliği sabit kalır (Şekil 2) [11].



Şekil 2: Kas kasılmasının şematik gösterimi [2].

A. Gevşemiş halde iken I, A ve H bantlarının konumu. İnce lifler, kalın liflerin uç kısımlarını kısmen örtmekte olup Z çizgilerine yapışmış haldedirler. B. Kasılma durumu. Aktin liflerinin miyosin liflerinin her iki yanından birbirlerine doğru kaymış oldukları görülmektedir. Kalın ve ince liflerin boylarında bir değişim olmamaktadır. Ancak sarkomerin boyu 2300 nm'den 1500 nm'ye kısalmıştır.

Kayma mekanizmasının kilit taşı, kasılma işlemini başlatıp bitiren kalsiyum iyonlarıdır (Ca^{2+}). Kas kasılması, kalsiyum kasılma elementi olarak kullanıldığında başlar ve kalsiyum taşınması durdurulduğunda biter. Mekanizmanın işleyişi, kullanılabilir kalsiyum iyonlarının kas zarında (sarkolemma) meydana getirdiği elektriksel olaylara dayanmaktadır.

Sarkolemmadaki hareket (aksiyon) potansiyeli, kasılmanın başlaması için gerekli elektrik sinyalini üretir. Elektrik sinyali ile tetiklenen kasılma mekanizmasının kimyasal boyutu, uyarılma – kasılma çifti olarak bilinir [3, 6].

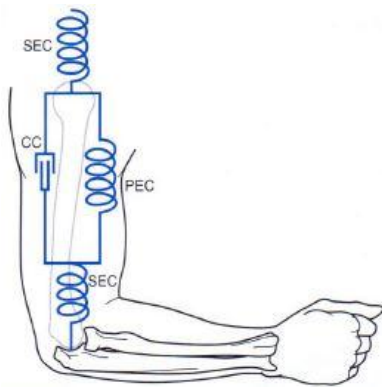
3.1. Motor birim

İskelet kaslarının işlevsel birimi, tekil motor nöronlarını ve sinir sistemine bağlı diğer tüm kas liflerini içeren motor birimdir. Bu birim kasın bağımsız olarak kasılabilen en küçük kısmıdır. Uyarılma anında motor birimdeki tüm kas lifleri yanıt verir. Motor birim lifleri ya hep birlikte uyarılır ya da hiç uyarılmazlar. Ya maksimum derecede kasılırlar veya hiç kasılmazlar. Motor birimdeki kas liflerinin sayısı kasın kontrol gereksiniminin derecesiyle yakından ilişkilidir. Küçük kaslarda; örneğin ekstraoküler kaslarda çok hassas hareketler gerçekleştirilir ve her bir motor

birim düzineden daha az sayıda lif içerir. Halbuki büyük kaslar; örneğin gasrtokinemius, kaba hareketleri sağlar ve motor birim 1000 ile 2000 arasında kas lifinden oluşur. Her bir motor birimdeki lifler bitişik değildir fakat diğer birimlerin lifleriyle birlikte kas boyunca düzensiz halde bulunurlar. Böylece tek bir motor birim uyarıldığında büyük miktarda kas kasılmış olur. Eğer sinir sistemine bağlı ilave motor birimler uyarılırsa, kas kasılması daha büyük bir kuvvet oluşturur. Motor sinirlerin daha fazla uyarılması için harekete geçen bu ilave motor birimler takviye olarak isimlendirilir [3, 6].

3.2. Kas ve tendon (Kiriş) birimi

Kasların içindeki ve etrafındaki bağlayıcı dokular ve tendonlar, kasılma ve pasif uzama esnasında kasın tüm mekanik özelliklerinin belirlemesini sağlayan viskoelastik bir yapıdadırlar. Hill tendonların kasılma elemanı (miyofiber, aktin ve miyosin) ile birlikte yay gibi bir esnek eleman olarak görev yaptığını göstermiştir [12] (Şekil 3). Epimsiyum, perimsiyum, endomsiyum ve sarkolemma kasılma elemanlarına paralel duran ikincil esnek elemanlardır. Paralel ve seri esnek bileşenler, kasların aktif kasılması veya pasif uzaması esnasında gerildiğinde gerginlik oluşur ve enerji depolanır. Kas gevşemesi ile birlikte geri çekilme oluştuğunda bu enerji serbest kalır. Seri esnek lifler, gerginlik oluşumunda paralel esnek liflere nazaran daha büyük önem arz ederler [13]. Birçok araştırmacı miyosin liflerindeki çapraz bağların yay özelliğine sahip olduğunu ve aynı zamanda kasın esnek yapısına katkı sağladığını belirtmişlerdir [14].

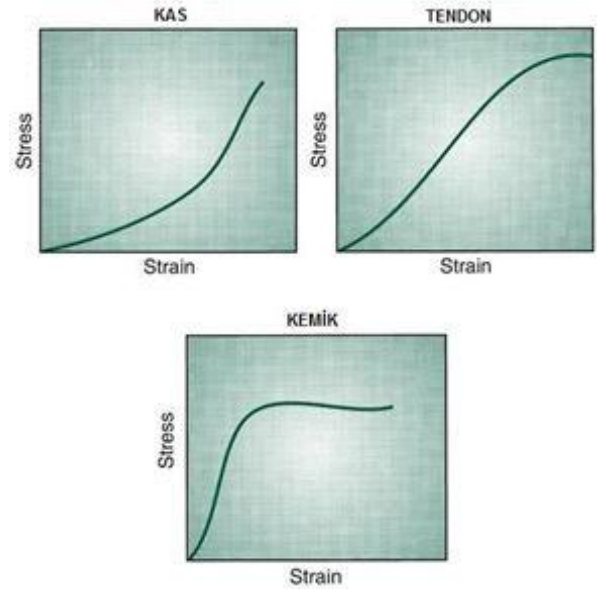


Şekil 3: Hill kas modeli [3].

Kas-kiriş birimi, kasılabilen bileşene (CC) paralel bağlı elastik bileşen (PEC) ve bunlara seri bağlı diğer bir elastik bileşen (SEC) şeklinde gösterilmiştir.

Tendonlar sert ve kuvveti kemiğe iletebilecek kadar sağlam olmalıdırlar. Aynı zamanda tendonların

histerizis özelliği düşük olmalıdır. Böylece elastik deformasyon enerjisini depolayıp geri iade edebilirler. Örneğin aşıl tendonu, aynı ölçülerdeki bir çelikle kıyaslandığında en az çelik kadar veya daha fazla miktarda çekme gerilmesine karşı koyabilir [6, 15]. Tendon, kas ve kemiklerin farklı mukavemet özellikleri Şekil 4'de görülmektedir. Kasın viskoelastikliği yüksek olduğundan düşük yükler altında çok çabuk uzar. Tendon ise çok sağlamdır ve yük taşıma yeteneği yüksektir. Tendonun yapısındaki kollajen lifler, ilave bir gerilim sağlar. Kemiğin davranışına bakacak olursak, kırılma yapısından dolayı hasara uğramadan önce çok az deforme olduğunu görürüz. Kemiğin gerilme-uzama davranışı belli bir oranda polimer malzeme karakteristiği göstermektedir.



Şekil 4: Kas, tendon ve kemik dokusunun gerilme-uzama eğrileri [6].

4. Kas Kasılmasının Mekanikliği

Bu bölümde iskelet kaslarının kasılma mekaniklerinden, kasılma türlerinden ve kaslardaki kuvvet üretiminden söz edilmiştir.

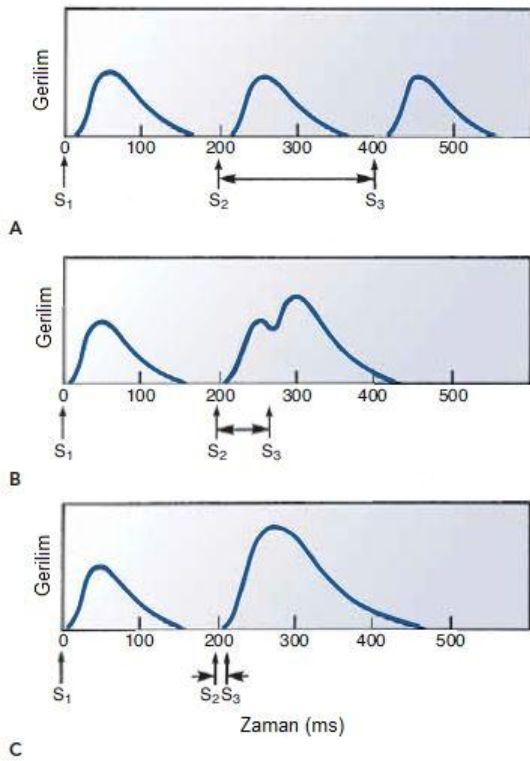
4.1. Toplam ve tetanik kasılma

Bir kasın kendi motor sinirinden gelen tek bir uyarıya verdiği tepki, kaydedilebilen kas aktivitesinin temel ögesi olan seğirme olarak bilinir. Uyarımı takiben kas lifindeki gerginlik artmaya başlamadan önce gecikme periyodu olarak bilinen ve birkaç mili saniyeden oluşan bir periyot vardır. Bu periyot elastik bileşenlerin kısılması için gerekli zamanı sağlar. Gerilmenin başlangıcından tepe gerilmeye kadar geçen zaman kasılma zamanıdır ve tepe gerilmeden sıfır gerilime kadar olan süre

gevşeme zamanıdır. Kasılma zamanı ve gevşeme zamanı kasta değişmektedir; çünkü bu durum kas lifi oluşumuna (daha sonra açıklanacak) bağlıdır. Bazı kas lifleri 10 ms hızında, bazıları ise 100 ms veya daha uzun sürede kasılmaktadır.

Bir hareket potansiyeli 1-2 ms sürmektedir. Zamanın bu kısa bölümü çok hızlı kasılmalarda bile sonraki mekanik cevap veya seğirme için gereklidir. Böylece motor akson çalıştığı sürece başlatılan ilk seğirme tamamlanır ve seri bir şekilde devam eden hareket potansiyeli sağlanmış olur. Ardışık uyarılara mekanik tepki verildiğinde başlangıç tepkisine eklenir ve sonuç toplanarak gider (Şekil 5). Eğer ilk kas seğirmesinden sonraki gecikme periyodu esnasında ikinci bir uyarı meydana gelirse tepki üretilmez ve kas tamamıyla direnç gösterir [16].

Uyarılma sıklığı değişkendir ve özel motor birim tarafından ayarlanır. Kas lifleri ne kadar sık uyarılırsa tüm kasta o kadar çok gerilme üretilir. Bununla birlikte maksimum uyarılma sıklığı kas gerginliğinin ötesinde bir artışa ulaşabilir. Maksimum gerginlik sürekli hale geldiğinde kas tetanik kasılma durumuna geçer. Bu durumda uyarı hızı, kasın kasılma-gevşeme zamanının ötesine geçer ve bundan dolayı sonraki kasılma başlamadan önce çok küçük bir gevşeme olabilir ya da hiç olmaz.



Şekil 5: Tek bir kas lifinin ardışık uyarılar sonucu ürettiği gerilim [3].

Kaslarda oluşan gerginlik yükün (veya hareketin) özelliğine göre, kas lifi türüne ve kasın çeşidine göre farklılık göstermektedir [17]. Tablo 1'de farklı canlılardaki farklı kas gruplarına ait bazı gerilme miktarları yer almaktadır.

Tablo 1: İskelet kaslarındaki belirli gerilmeler. SO; yavaş seğiren, FOG; hızlı seğiren oksidatif.

Tür	Kas türü	Ölçüm	Gerilim (kPa)	Kaynak
Fare	SO	Tek lif	134	[18]
İnsan	Yavaş	Tek lif	133	[18]
Fare	FOG	Tek lif	108	[18]
İnsan	Hızlı	Tek lif	166	[18]
Kedi	2A	Motor birim	284	[19]
İnsan	Dirsek	Tüm kas	230-240	[20]
İnsan	Ayak bileği	Tüm kas	45-250	[21]
Kobay	Arka bacak	Tüm kas	225	[22]

4.2. Kasılma türleri

Literatürde kas kasılmasıyla ilgili farklı sınıflandırmalar mevcuttur. En temel üç kasılma türü; izometrik, konsentrik ve eksantrik kasılmadır. Bunların haricinde, izokinetik, izoinertal ve izotonik kasılma türleri de tanımlanmıştır. Son üç kasılma türü, başta sayılan diğer üç temel türün kombinasyonu biçiminde ortaya çıkmaktadır.

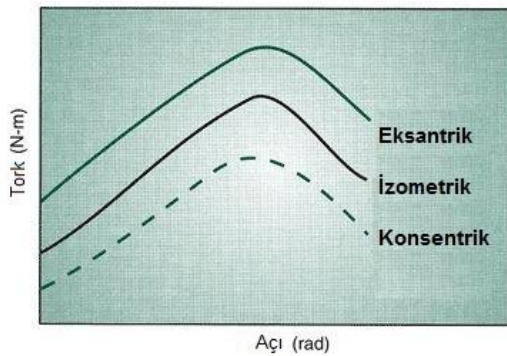
Kasılma sırasında kuvvet, tendon olarak bilinen kemikli kısım üzerindeki kas tarafından kullanılır. Kasa uygulanan dış kuvvet direnç ya da yük olarak bilinir. Kas kendi kuvvetini uygularken ilgili eklem üzerinde moment veya tork meydana gelir. Kas kasılması ve oluşan kas işi, kas gerginliği ve kas direnci veya üretilen kas momenti arasındaki ilişki açısından aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [3, 6, 17].

- **İzometrik kasılma:** Kaslar her zaman ilgili eklem hareketinin oluşmasına doğrudan katkı sağlamazlar. Kaslar harekete mani olacak şekilde çalışabilirler. Örnek olarak yer çekimine karşı vücudun dik duruşunu koruması verilebilir. Bu durumda kaslar kısılmaya çalışır; fakat yükün ve hareketin üstesinden gelemezler. Bunun yerine sabit bir şekilde yüke destek olurlar.

- **Konsentrik kasılma:** Kaslar vücut uzuvlarının direncinin üstesinden gelebilecek yeterlikte gerginlik ürettiğinde kaslar kısalır ve eklemler hareket eder. Kaslar tarafından üretilen net moment, eklem açısının değişimi ile aynı yöndedir. Konsentrik kasılmaya örnek olarak basamak çıkarken diz eklemi içindeki kuadriseps kasının hareketi verilebilir.
- **Eksantrik kasılma:** Bir kas yeterli gerginlik üretmediğinde ve dış yükün üstesinden gelemediğinde kısılacığı yerde devamlı olarak uzar. Net kas momenti, eklem açısı değişiminin tersi yönünde oluşur. Eksantrik kasılmanın bir amacı eklem hareketini yavaşlatmaktır. Örneğin basamak inerken kuadriseps eksantrik olarak kasılır diz fleksiyonunu yavaşlatır. Böylece gövde yavaşlatılır.

İzometrik kasılma sırasında bir hareket yapılması ve mekanik iş oluşması bile kas işi (psikolojik iş) gerçekleştirilir. Enerji harcanır ve çoğunlukla ısı olarak boşa gider. Buna izometrik ısı üretimi denir. Tüm dinamik kasılmalar başlangıçta statik (izometrik) bir durum gibi kabul edilir ve kas, yüke eşit bir gerilme üretir.

Bir kasın gerginliği kasılma türüne göre değişiklik gösterir. İzometrik kasılmalar konsentrik kasılmalara göre daha büyük gerginlik üretir. Bu alandaki çalışmalar eksantrik kasılma sırasında üretilen gerginliğin izometrik kasılmalar esnasında üretilen gerginliği aşabildiğini göstermektedir (Şekil 6). Bu farklılıkların önemli nedeninin kaslardaki seri haldeki esnek bileşenler tarafından üretilen farklı sayıdaki ilave gerginlik ve kasılma zamanlarındaki farklılık olduğu düşünülmektedir. İzometrik ve eksantrik kasılmaların daha uzun kasılma süresi, kasılabilen bileşenler yardımıyla daha fazla çapraz bağ etkileşimine izin vermektedir. Böylece daha büyük gerginliğe müsaade edilmektedir [23].



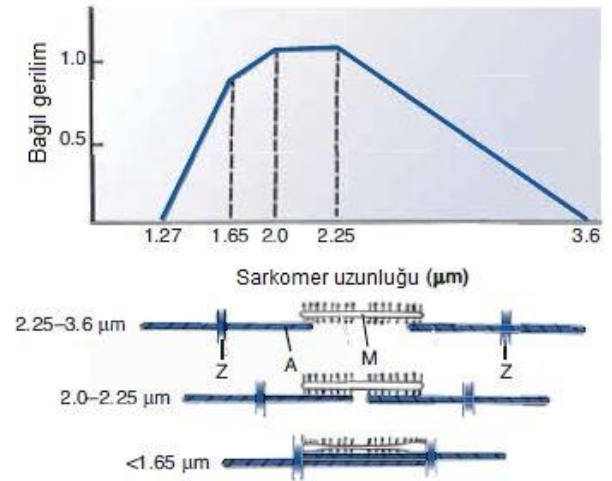
Şekil 6: Üç farklı kasılmadaki kuramsal tork çıkışı [24].

4.3. Kaslarda kuvvet üretimi

Bir kasın üretebildiği toplam kuvvet kasın uzama-gerginlik, yük (kuvvet)-hız ve kuvvet-zaman ilişkisi gibi mekanik özelliklerinden ve iskelet kaslarının yapısından (örneğin lif açısı) etkilenir. Kuvvet üretimindeki diğer temel faktörler; kas sıcaklığı, kas yorgunluğu ve ön germe işlemidir.

4.3.1. Uzama – gerginlik ilişkisi

Kas uyarıldığında meydana gelen uzama ile kuvvet veya gerginlik meydana gelir. Bu durum tek bir lifin izometrik ve tetanik kasılması sırasında gözlemlenebilir (Şekil 7). En büyük gerginlik kas lifi gevşediğinde ve dinlenmeye geçtiğinde gerçekleşir. Eğer kas lifi kısalırsa, gerginlik önce yavaşça ardından hızlı bir şekilde düşer. Eğer lif dinlenme anındaki uzunluğundan daha da uzarsa gerginlik sürekli olarak azalır [25].



Şekil 7: Farklı uzunluklarda uyarılmış tek bir izole kas lifinin gerginlik-uzama eğrisi [3].

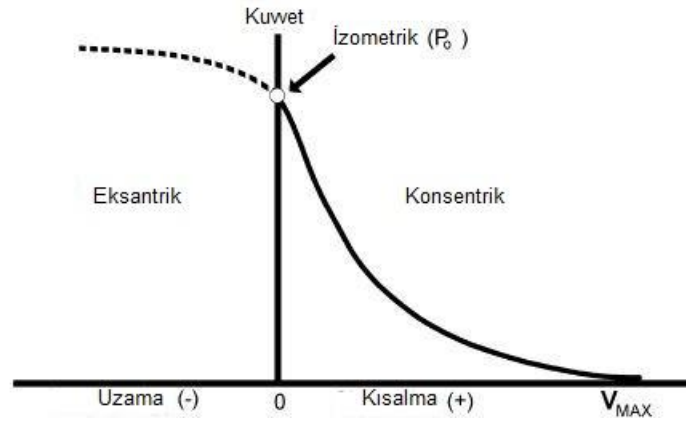
Kas lifinin gerilmesi veya kısalması sırasında gerginlikte meydana gelen değişimler öncelikli olarak sarkomerin değişken yapısıyla ilgilidir. Maksimum izometrik gerginlik, sarkomerler dinlenme uzunluğundayken (2.0 - 2.25 µm) meydana gelir çünkü aktin ve miyosin lifleri uzunluk boyunca üst üste gelmektedirler. Eğer sarkomerler uzarsa, lifler arasında daha az bağlantı oluşur ve aktif gerginlik azalır. Sarkomer uzunluğu 3.6 µm olduğunda üst üste gelme oluşmaz ve bundan dolayı aktif gerginlik meydana gelmez.

Önceki bölümde (4.2) konsentrik kasılmaların izometrik kasılmalara göre daha yüksek gerilim ürettiğinden bahsedilmişti (Bkz. Şekil 6). Dolayısıyla kas uzadığında daha fazla gerilim üretmesi beklenir. Ancak bu durum tüm kasın

kasılması sırasında görülür. Şekil 7'de görülen durum tek bir kas lifi için geçerli olduğundan sarkomer uzunluğunun artmasıyla daha büyük bir gerilim beklemek doğru olmaz. Kas uzadığında oluşan ilave gerilim, tendonlardaki esnek bileşenler tarafından üretilmektedir.

4.3.2. Kuvvet (yük) hız ilişkisi

Kasın kısılma hızı veya eksantrik uzaması ve farklı sabit yükler arasındaki ilişki kas manivela kolunun farklı dış yüklerdeki hız grafiği ile belirlenebilir.



Şekil 8: In vitro çalışmaya dayalı kuvvet-hız ilişkisi [17].

4.3.3. Kuvvet – zaman ilişkisi

Bir kas tarafından üretilen kuvvet veya gerginlik kasılma zamanı ile orantılıdır. Kasılma zamanı arttıkça maksimum gerginlik oluşana kadar geçen sürede kuvvet de artar. Yavaş kasılma yüksek kuvvet üretimi sağlar; çünkü geçen süre, tendonlardaki paralel elastik bileşenler sayesinde gerginlik üretimine olanak tanır. Tendonlardaki gerginlik, eğer aktif kasılma süreci yeterli sürede gerçekleşirse kasılabilen elemanlar sayesinde maksimum seviyeye ulaşır [27].

4.4. Kas yapısının mekanik özelliklere etkisi

Kasların uzunluklarına, lif ve demetlerinin açlarına ilişkin yapıları; kuvvet üretimi gibi biyomekanik özellikler üzerinde büyük etkiye sahiptir [28]. Kolineer kaslar, göbek uzunluklarına bağlı olarak yarı yarıya veya üçte bir oranında kısalabilirler. Bu tür kaslar geniş hareket aralığına sahiptirler ve ekstremitelerde yaygın olarak bulunurlar.

Pennate kaslar, kolineer kaslardan daha kısa fasiküllere sahiptirler ve fasikülleri ile tendonları arasında belirli bir açı vardır. Bu özellikleri onları daha sağlam ve güçlü hale getirmektedir [29].

Böylece bir yük-hız eğrisi oluşturulur (Şekil 8). Konsantrik kas kasılmasındaki kısılma hızı uygulanan dış yük ile ters orantılıdır. Kısılma hızı, dış yük sıfır olduğunda en büyüktür fakat yük artarken kas daha yavaş kısılır. Dış yük kas tarafından uygulanan maksimum kuvvete eşit olduğunda kısılma hızı sıfır olur ve kas izometrik kasılır. Yük artmaya devam ettiğinde kas eksantrik kasılır ve kısılma sırasında uzar. Yük-hız ilişkisi konsantrik kasılmada tersine döner ve yükün artışıyla kas daha çabuk eksantrik uzar [8, 23, 26].

Kaslar, aktif gerginlik üreten kasılabilen bileşenlerden (sarkomer) oluşurlar. Kasılabilen elemanların dizilimi kasın kısılma özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Seri olanlarda ne kadar çok sarkomer bulunursa o kadar uzun miyofiber oluşur; paralel olanlarda ne kadar çok sarkomer bulunursa miyofiberlerde o kadar geniş çapraz bağ alanı oluşur. Miyofiberlerin (uzun ya da kalın) bu iki temel yapısal dağılımı, hız ve çalışma alanı sayesinde kasın kısılma özelliklerini etkiler. Kaslar, kısa lifler ve geniş çapraz bağlar ile kuvvet üretimi için tasarlanmıştır. Uzun lifler ise sapma ve hız için tasarlanmıştır. Kuadriseps kası daha kısa lifler içerir ve kuvvet üretimi için özelleşmiştir. Sartorius kası daha uzun liflere ve küçük çapraz bağlara sahiptir ve yüksek sapma için daha uygundur.

5. Kas Lifi Farklılaşması

Önceki bölümde kas kasılırken tüm kas tarafından üretilen toplam gerginlik tanımlanmıştır. İlave olarak tekil kas lifleri farklı kısılma oranları, gerginlik üretimi ve yorulma duyarlılığı sergilerler. Kas liflerinin sınıflandırılmasını sağlayan çok fazla yöntem vardır. 1678 gibi erken bir dönemde Lorenzini kırmızı ve beyaz kaslar arasındaki büyük farklılığı gözlemlemiştir. 1873'de Ranvier kasları çalışma ve yorulma hızlarına göre türlere ayırmıştır.

İskelet kaslarının sınıflandırılmasına ilişkin karışık terminolojiye rağmen son zamanlardaki histolojik ve histokimyasal incelemeler kas liflerinin kasılma ve metabolik özelliklerine göre üç belirgin tür olarak tanımlanmasına öncülük etmiştir [30].

Lif türleri ATP üretimi ve kasılma hızını belirleyen sarkomerin kasılmasındaki enerji üretimi sayesinde metabolik yollar üzerinde fark edilebilir hale gelir. Bu üç tür lif; yavaş seğiren oksidatif (SO) kırmızı lifler için tür I, hızlı seğiren oksidatif glikolitik (FOG) kırmızı lifler için tür IIA ve hızlı seğiren glikolitik (FG) beyaz lifler için tür IIB olarak adlandırılmıştır. Tür I (SO) lifleri kastaki düşük miyosin ATPaz hareketini tanımlamaktadır ve bu nedenle kasılma süreleri göreceli olarak yavaştır.

Glikolitik (anaerobik) aktivite bu tür liflerde yavaştır fakat yüksek mitokondri içeriği oksidatif (aerobik) aktivite için yüksek potansiyel oluşturur. Tür I lifleri çok zor yorulurlar çünkü bu liflerdeki yüksek miktardaki kan akışı ATP'nin göreceli olarak yavaş bir şekilde miyosin ATPaz'a dönüşümünde yeterli miktarda oksijen ve besin sağlar. Böylece lifler düşük yoğunluklu işlerde uzama için uygun hale gelir. Bu lifler nispeten daha küçük çaptadırlar ve bu nedenle görece düşük gerginlik üretirler.

Tür II lifleri, kuluçka davranışlarındaki duyarlılığa göre IIA ve IIB olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Üçüncü bir alt grup olan tür IIC lifleri çok nadir görülür ve gebeliğin otuzuncu haftasından önce fark edilemezler. Bu tür lifler insan kaslarında çok seyrek görülür. Tür IIA ve IIB liflerinin miyosin ATPaz aktiviteleri yüksektir ve göreceli olarak hızlı kasılırlar.

Tür IIA (FOG) liflerinin tür I ve tür IIB arasında oldukları kabul edilir. Çünkü bu liflerin hızlı kasılma süreleri aerobik (oksidatif) ve anaerobik (glikolitik) aktivite sırasında kapasite kullanımının orta düzeyli kombinasyonudur. Bu lifler aynı zamanda iyi bir kan kaynağıdır. Onlar uzun kasılma periyotları için kasılma aktivitelerini sağlayabilirler. Fakat yüksek oranlı aktivitelerde, yüksek oranlı ATP bölünmelerinde hem oksidatif fosforilasyonda hem de glikolizde gereken ATP ihtiyacını karşılamada yetersiz kalırlar ve bu lifler sonunda yorulurlar.

Tür IIB (FG) lifleri ATP üretimi için glikolitik (anaerobik) aktivitede kullanılırlar. Bu liflerin çevresinde çok az kılcak damar bulunur çünkü onlar az miktarda miyoglobinin içerirler ve beyaz kas olarak adlandırılırlar. Tür IIB lifleri çok hızlı bir şekilde ATP üretebilmelerine rağmen çok çabuk yorulurlar. Çünkü hızlı ATP bölünmesi glikoliz için gerekli glikojeni tüketmektedir. Bu lifler genellikle

geniş çaplıdırlar. Bu sayede, sadece yorulmadan önceki kısa bir süre için büyük miktarda gerginlik üretebilirler [3, 30, 31].

Kasın maksimum kuvvete ulaşabilmesi için gereken zaman kastaki lif türüne göre değişiklik göstermektedir. Örneğin SO (yavaş seğiren) tür bir lifin maksimum kuvvete erişmesi için gereken süre, FG (hızlı seğiren) tür bir life göre yaklaşık iki kat daha fazladır [26].

Kasların lif dağılımı kas fonksiyonuna bağlıdır. Bazı kaslar kasılma sırasında daha baskın rol oynarlar ve çoğunlukla tek kas türünden meydana gelirler. Bir örnek olarak kalfdeki soleus kası gösterilebilir. Bu kas öncelikli olarak duruş pozisyonunu sağlar ve yüksek orandaki tür II lifi içerir. Fakat bir kas bazı koşullar altında dayanıklılık gerektiren aktiviteler ortaya koyar. Bu kaslar genellikle üç tür kas lifinin karışımını ihtiva ederler.

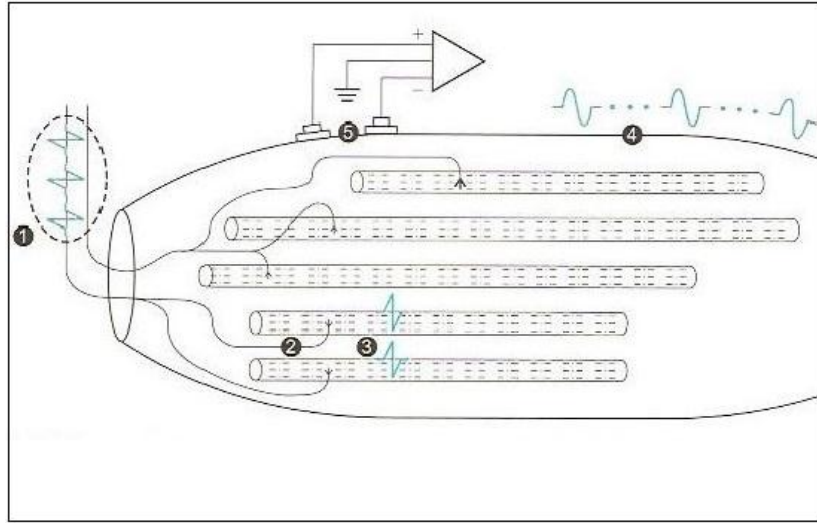
Genellikle lif türlerinin genetik olarak kararlı olduğu kabul edilir [32, 33]. Ortalama bir popülasyonda kas liflerinin yaklaşık %50-55'i tür I, yaklaşık %30-35'i tür IIA ve yaklaşık %15'i tür IIB'den oluşur fakat bu yüzdeler bireysel farklılıklara göre değişir.

6. Elektromiyografi (EMG)

Elektromiyografi, canlı ortamda (in vivo) ve yapay koşullarda (in vitro) kasların kasılma mekaniğinin değerlendirilmesini ve sinirsel etkilerinin karşılaştırılmasını sağlar. Bu yöntemde kullanılan cihaza elektromiyograf, cihazın kaydettiği veriye elektromiyogram denilir. EMG, insan vücudu tarafından üretilen işaretlerin en kuvvetlisidir. İşaretin genliği bazı bireylerde 1-2 volt seviyelerine kadar çıkabilmektedir.

Çeşitli kasılma süreçlerinin anlaşılması hususunda elektromiyografiden yararlanılması çok şey öğretmiştir. Özellikle kaslardaki veya kas lifindeki elektriksel aktivitenin başlangıcı ve gerçek kasılma ile zaman arasındaki ilişkinin anlaşılması sağlanmıştır.

Beyinden gelen uyarılar, sinirler vasıtasıyla ilgili motor birime iletildiğinde kas hücresinde meydana gelen kimyasal değişimler bir aksiyon (hareket) potansiyeli başlatır. Uyarılan hücre, iyonik akım sayesinde bir elektriksel fark üretir. Kaslarda meydana gelen elektriksel gerilimin ölçülebilmesi için deri üzerine veya deri altındaki kasa elektrotlar yerleştirilir. Bu sayede vücut tarafından üretilen işaret algılanmış olur (Şekil 9). EMG işleminde farklı elektrotlar kullanılmaktadır.



Şekil 9: (1); Motor nöron kas lifini uyardığında aksiyon potansiyeli (AP) başlatılır. (2); AP motor uç plakalarına ulaşır. (3); AP, elektrokimyasal bir süreçle lif boyunca ilerler. (4); toplam kas potansiyeli oluşur. (5); biyolojik sinyal deri üzerinden ölçülür [34].

En yaygın kullanılanları gümüş, altın, paslanmaz çelik ve hatta kalay gibi metal malzemelerden üretilen yüzey elektrotlardır. Bunlar tüm kastaki sinyali ölçerler. Kullanılan diğer elektrotlar, ince tel ve iğne şeklindeki elektrotlardır. Bunlarla kaslara ait daha küçük birimlerin (fasikül, motor birim, vb.) sinyalleri ölçülebilir.

Ölçümlerin ardından elde edilen veriler filtreleme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu sayede diğer organların, EMG cihazının ve dış ortamın bozucu etkileri azaltılmış olur. Eğer gerekiyorsa düşük genlikli verilere yükseltme işlemi uygulanır. Daha sonra elde edilen analog veri dijital yapıya dönüştürülür. Sayısal hale gelen veri son olarak cihazın ekranında görüntülenir. Aynı hareket sırasında değişik kas gruplarının ürettiği sinyaller birbirine göre farklılık gösterebilir [1, 3, 26, 34, 35].

7. Sonuç

İskelet kaslarının yapısal birimi endomysyum ile sarılı ve perimsiyum ile kaplı olan liflerdir. Bu lifler, bant yapısında olan miyofiberlerden oluşmaktadır ve kasılma sisteminin fonksiyonel birimi sarkomerdir. Kayan lifler teorisine göre kasın aktif kısalması, aktin ve miyosin liflerinin birinden diğerine doğru gerçekleşen bağlı hareket neticesinde olur. Aktin ve miyosinin birbirlerine bağlanarak bir çapraz bağ oluştururlar ve çapraz bağın hareketiyle kuvvet üretimi gerçekleşir.

Kaslardaki kuvvet üretimi temel olarak; kasın uzama-gerginlik, kuvvet-hız ve kuvvet-zaman ilişkilerinden etkilenir. Bununla birlikte kas sıcaklığı ve ön germe işlemi kuvvet üretimini

artıran diğer iki faktördür. Ayrıca titreşimin kuvvet üretimi üzerindeki etkilerine yönelik çalışmalar da mevcuttur; ancak sonuçlar çelişkilidir [36, 37]. Kas, kişi tarafından kullanılmadığında körelir. Bu durumda dayanıklılık ve kuvvet üretiminde düşüş meydana gelir. Düzenli egzersizin kas kompozisyonu ve kas mekaniği üzerinde olumlu etkileri mevcuttur [28].

Bu çalışmada son elli yıl içinde gerçekleştirilen ve literatürde yer edinmiş araştırmaların sonuçlarından faydalanılarak iskelet kaslarının yapıları ve biyomekaniği hakkında temel bilgiler sunulmuştur. Bu bilgilerin ülkemizde biyomekanik alanında çalışmaya başlayan yeni araştırmacılara fayda sağlayacağı düşünülmektedir. İskelet kaslarının biyomekanik özelliklerinin tartışıldığı bölümler sayesinde bu alandaki yerli kaynak boşluğunun doldurulması beklenmektedir.

Son yıllarda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar sayesinde kas ve tendon mekaniği alanında yeni bulgular elde edilmektedir. Ayrıca bilgisayar yazılımlarındaki gelişmeler sayesinde, kas kasılmasına yönelik simülasyon çalışmalarında başarılı sonuçlar alınmaktadır [38-40].

Kaynaklar

- [1] Pandey, M. G. ve Barr, R. E., Standard handbook of the biomedical engineering and design, McGraw-Hill, 2000.
- [2] Murray, R. K., Granner, D. K., Mayes, A. P. ve diğ., (Dikmen, N. ve Özgünen, T.), *Harper'in biyokimyası*, Nobel Tıp Kitabevleri, 2004.

- [3] Nordin, M. ve Frankel, V. H., *Basic biomechanics of the musculoskeletal system*, LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS, 2012.
- [4] Onat, T., Emerk, K. ve Sözmen, E., *İnsan biyokimyası*, Palme Yayıncılık, 2002.
- [5] Beason, D., Soslowsky, L., Karthikeyan, T., ve diğ., *Muscle, tendon and ligament*, American of Orthopedic Surgeons, 2007.
- [6] Hamill, J. ve Knutzen, K. M., *Biomechanical basis of human movement*, LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS, 2009.
- [7] Arvidson, I., Eriksson, E. ve Pitman, M. (Hunter, E. ve Funk, J.), *Neuromuscular basis of rehabilitation*, Rehabilitation of the Injured Knee, 1984.
- [8] Guyton, A. C., *Textbook of medical physiology*, J. B. Lippincott, 1986.
- [9] Huxley, A. F. ve Huxley, H. E., "A discussion on the physical and chemical basis of muscular contraction. Introductory remarks", *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, 160, 433, 1964.
- [10] Huxley, A. F., "Muscular contraction", *J Physiol*, 243, 1, 1974.
- [11] Craig, R., *The structure of contract filaments*, McGraw-Hill, 1994.
- [12] Hill, A. V., *First and last experiments in muscle mechanics*, Cambridge University Press, 1970.
- [13] Wilkie, D. R., "The mechanical properties of muscle", *Br Med Bull*, 12, 177, 1956.
- [14] Hill, D. K., "Tension due to interaction between the sliding filaments of resting striated muscle. The effect of stimulation", *Physiol [Lond]*, 199, 637, 1968.
- [15] Apaydın, N., Serhan, Ü., Bozkurt, M., ve diğ., "Aşıl tendonu'nun fonksiyonel anatomisi ve biyomekanik özellikleri", *TOTBİD Dergisi*, 10, 61-68, 2011.
- [16] Luciano, D. S., Vander, A. J. ve Sherman, J. H., *Human function and structure*, McGraw-Hill, 1978.
- [17] Peterson, R. D. ve Bronzino, J. D., *Biomechanics principles and applications*, CRC Press, 2008.
- [18] Fitts, R. H., McDonald, K. S. ve Schluter, J. M., "The determinants of skeletal muscle force and power: Their adaptability with changes in activity pattern", *Journal of Bomechanics*, 24, 111-122, 1991.
- [19] Ilia, A. R. ve Dum, R. P., "Somatotopic relations between the motor nucleus and its innervated muscle fibers in the cat tibialis anterior", *Experimental Neurology*, 86, 272-292, 1984.
- [20] Edgerton, V. R., Apor, P. ve Roy, R. R., "Specific tension of human elbow flexor muscles", *Acta Physiologica Hungarica*, 75, 205-216, 1990.
- [21] Fukunaga, T., Roy, R. R., Shellock, J. A. ve diğ., "Specific tension of human plantar flexors and dorsiflexors", *J Appl Physiol*, 80, 158-165, 1996.
- [22] Powell, P. L., Roy, R. R., Kanim, P. ve diğ., "Predictability of skeletal muscle tension from architectural determinations in guinea pig hindlimbs", *J Appl Physiol*, 57, 1715-1721, 1984.
- [23] Kroll, P. G., *The effect of previous contraction condition on subsequent eccentric power in elbow flexor muscles*, Doktora Tezi, New York University, 1987.
- [24] Enoka, R. M., *Neuromuscular basis of kinesiology*, Human Kinetics, 1988.
- [25] Crawford, C. N. C. ve James, N.T. (Owen, R., Goodfellow, J. ve Bullough, P.), *The design of muscle*, Scientific Foundations of Orthopaedics and Traumatology, 1980.
- [26] Knudson, D., *Fundamentals of biomechanics*, Springer, 2007.
- [27] Ottoson, D., *Physiology of the Nervous System*, Oxford University Press, 1983.
- [28] Blazeovich, A. J., "Effects of physical training and detraining, immobilization, growth and aging on human fascicle geometry", *Sports Med*, 36, 1003-1017, 2006.
- [29] Bartlett, R., *Introduction to sports biomechanics analysing human movements patterns*, Taylor & Francis, 2007.
- [30] Bunchtahl, F. ve Sohmaburch, H., "Motor units of mammalian muscle", *Physiol Rev*, 60-142, 1980.
- [31] Brandstater, M. E. ve Lambert, E. H., "A histologic study of the spatial arrangements of muscle fibers in single motor units within rat tibialis anterior muscle", *Bull Am Assoc Electromyog Electro Diag*, 82, 15, 1969.
- [32] Costill, P. L., Coyle, E. F., Fink, W. F. ve diğ., "Adaptations in skeletal muscles following strength training", *J Appl Physiol*, 46, 96, 1979.
- [33] Gollnick, P. D., "Relationship of strength and endurance with skeletal muscle structure and metabolic potential", *J Sports Med*, 3, 26, 1982.
- [34] Gordon, D., Robertson, E., Caldwell, G. E. ve diğ., *Research methods in biomechanics*, Human Kinetics, 2004.

- [35] Merletti, R., Botter, A., Troiano, A. ve diğ., “Technology and instrumentation for detection and conditioning of the surface electromyographic signal: State of art”, *Clinical Biomechanics*, 24, 122-134, 2009.
- [36] Blottner, D., Salanova, M., Puttman, B. ve diğ., “Human skeletal muscle structure and function preserved by vibration muscle exercise following 55 days of bed rest”, *Eur J Appl Physiol*, 97, 261-271, 2006.
- [37] Jacobs, P. L. ve Burns, P., “Acute enhancement of lower-extremity dynamic strength and flexibility with whole-body vibration”, *J Strength Cond Res*, 23, 51-75, 2009.
- [38] Ren, L., Qian, Z., Ren, L., “Biomechanics of musculoskeletal system and its biomimetic implications: A review”, *Journal of Bionic Engineering*, 11, 159-175, 2014.
- [39] Tang, C. Y., Zhang, G., Tsui, C. P., “A 3D skeletal muscle model coupled with active contraction of muscle fibres and hyperelastic behaviour”, *Journal of biomechanics*, 42, 865-872, 2009.
- [40] Raikova, R., Aladjov, H., Celichowski, J. ve diğ., “An approach for simulation of the muscle force modeling it by summation of motor unit contraction forces”, *Computational and Mathematics Methods in Medicine*, 2013, 1-10, 2013.