



Spastik Diz Fleksör Kasların Kuvvet Üretme Karakteristikleri: İntraoperatif Testler ve Hastaya Özgü Kas-İskelet Modelleri

Force Production Characteristics of Spastic Knee Flexor Muscles: Intraoperative Tests and Patient-Specific Musculoskeletal Models

Cemre Su Kaya, Utku Can ve Can A. Yücesoy

Biyomedikal Mühendisliği Enstitüsü
Boğaziçi Üniversitesi
İstanbul, Türkiye

su.kaya@boun.edu.tr, utku.can@boun.edu.tr, can.yucesoy@boun.edu.tr

Özetçe—Serebral palsi hastalığında, hareket sırasında, diz ekstansiyonuna karşı artmış bir patolojik direnç gözlemlenmektedir. Diz ekleminin zorla fleksiyon pozisyonunda tutulmasına yol açan bu yüksek kuvvetlerin kaynağı, spastik diz fleksör kaslarının pasif ve aktif koşuldaki mekanik davranışına atfedilir. Ancak, bu kuvvetlerin doğrudan ölçüldüğü çalışmalar oldukça nadirdir. Bu çalışmada, spastik semitendinosus ve gracilis kaslarının pasif ve aktif koşullardaki kuvvet üretme kapasiteleri doğrudan intraoperatif mekanik testlerle ölçülmüştür. Kas mekaniği ile ilgili elde edilen bu kuvvet bilgisi ile hastaların yürüme ilişkilerinin kurulması için, OpenSim yazılımı kullanılarak hastaya özgü kas-iskelet modelleri geliştirilmiştir. Bulgular, hastaların spastik kaslarının yürüme boyunca gösterdikleri operasyonel kas-tendon birimi uzunluğu değişimlerinin, sağlıklı kişilerle benzer karakteristikte olduğuna işaret etmiştir. Ayrıca, tipik olarak yüksek pasif ve aktif kuvvet üretimi uzun kas-tendon birimi boylarında söz konusudur ve ilgili kasların toplam tendon kuvvetlerinin baskın bileşeni aktif kuvvetlerdir. Bu sebeple, spastik kasların mekanik özelliklerinin sağlıklı kişilerden belirgin farklılıklar göstermedikleri; hastaların yürümesinde gözlenen sınırlandırılmış eklem hareketini açıklayabilecek nitelikte olmadığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler — Serebral palsi; Spastik kas mekaniği; Semitendinosus; Gracilis; Kas-iskelet sistemi modeli.

Abstract— In cerebral palsy, an increased pathological resistance against knee extension is observed on rest and during walking. The source of these high forces that cause the knee joint to be held in a forced flexion position is attributed to the passive and active mechanics of the spastic knee flexor muscles. However, studies directly quantifying such forces in intraoperative experiments are sparse. In this study, the force production capacities of spastic semitendinosus and gracilis muscles were measured directly by intraoperative mechanical tests, under passive and active conditions. In order to establish the relationship between those muscle level mechanical force

information with the patients' gait, subject-specific musculoskeletal models were developed using OpenSim software. The results indicated that the changes in patients' operational muscle-tendon lengths seen through the gait cycle are similar to those of typically developing. Besides, high passive and active force generation is typically observed at the longer muscle-tendon lengths, and the dominant component of the total tendon forces of these targeted muscles is the active forces. Therefore, the mechanical characteristics of the spastic muscles have been shown not to importantly differ from healthy individuals, and not capable of explaining the limited joint movement observed in patients' gait.

Keywords — Cerebral palsy; Spastic muscle mechanics; Semitendinosus; Gracilis; Musculoskeletal system modelling.

I. GİRİŞ

Spastik serebral palsi (SP) hastalarında, hareket sırasında diz ekstansiyonuna karşı aşırı direnç gözlenmektedir. Bu patolojik direncin kaynağı, spastik diz fleksör kaslarının pasif ve aktif koşuldaki mekanik özelliklerine atfedilmektedir. Ekibimiz, intraoperatif mekanik testlerle, spastik diz fleksörü semitendinosus (ST) ve gracilis (GRA) kaslarının tek başlarına uyarıldıkları aktif koşuldaki kuvvet üretme kapasitelerini göstermiştir. Ancak bulgular, bu spastik kasların sağlıklı kişilerde olduğu gibi [1] fleksiyon pozisyonunda düşük kuvvet ürettiklerini ve maksimum kuvvetlerini ise ekstansiyon pozisyonlarında üretme eğilimlerinde olduklarını göstermiştir [2,3]. Böylece, patolojik harekete sebep olan abartılı fleksör kuvvetlerin kaynağı ortaya çıkarılmamıştır. Diğer yandan, spastik kasların pasif kuvvet üretme kapasiteleri daha önce doğrudan ölçülmemiş, kas düzeyi mekanik bilgilerle hastanın yürüme ilişkisi kurulmamıştır. Çalışmanın amacı, spastik diz fleksörü ST ve GRA kaslarının, farklı eklem pozisyonlarında ürettikleri pasif ve aktif kuvvetlerin intraoperatif olarak

ölçülmesi ve bu verinin kas-iskelet modeli kullanılarak daha önce hiç yapılmamış biçimde yürüme sırasında oluşan kas-tendon birimi uzunlukları ile ilişkilendirilmesidir.

II. YÖNTEM

A. Cerrahi İçi Kuvvet Ölçümü:

Spastik SP tanısı konmuş 7 çocuk (GMFCS-II; hastaların 6'sı diplejik, diğeri ise hemiplejiktir; Modifiye Ashworth skalası hamstring ve addüktör kaslar için en az 1+’dir) çalışmaya alındı. Ameliyat öncesi yürüme analizleri Helen Hayes Protokolüne bağlı kalınarak [4], 6 kızıl-ötesi kamera ve 2 kuvvet platformundan (Kistler Instrumente AG, Winterthur, İsviçre) oluşan yürüme analizi sistemi (ELITE 2002, BTX Bioengineering, Milano, İtalya) ile yapıldı. İntraoperatif olarak hastalar (toplam 10 bacak) test edildi. ST ve GRA kaslarının distal tendonlarına kuvvet çeviriciler (TEKNOFIL, Türkiye) takıldı ve test edilen hedef kasların üstüne cilt üzerinde elektrotlar (Kendall H92SG, Covidien, MA, USA) yerleştirildi. ST ve GRA kas kuvvetleri (F_{ST} ve F_{GRA}) sırasıyla hiçbir stimülasyonun yapılmadığı pasif koşulda ve ardından yalnızca hedef kasın stimüle edildiği aktif koşulda ölçüldü. Kas uyarımı, bir sabit akım yüksek gerilim kaynağı (cccVBioS, TEKNOFIL, Türkiye) ile sağlandı. Kuvvet ölçümü 45° ve 20° kalça fleksiyonunda, beşer farklı diz açısında (120° fleksiyondan, tam diz ekstansiyonu 0° 'ye dek 30° arttırmalarda) olmak üzere 10 farklı kalça-diz eklem açısı kombinasyonunda alındı.

B. Hastaya Özgün Kas-İskelet Modelleri

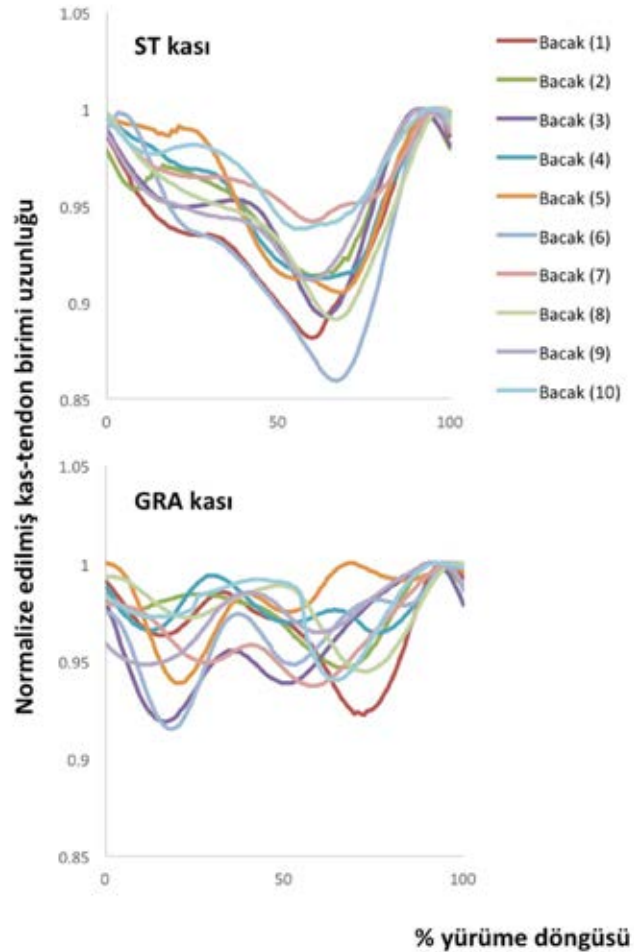
Test edilen her bir bacak için (i) yürüme sırasındaki operasyonel kas-tendon birimi uzunluğu değişimlerinin incelenmesi ve (ii) intraoperatif olarak elde edilen kas kuvvetleri ile yürüme analizi verilerinin ilişkisinin kurulması amaçlarıyla, OpenSim yazılımında bulunan gait_2392 modeli kullanılmıştır [5]. Her bir hastanın statik pozisyonu, yürüme analizindeki statik ölçümden elde edilmiş vücut kütlesi ve yüzey işaretleyicisi pozisyonları bilgileri kullanarak, *scale tool* aracılığıyla, gerçek antropometrik oranlarda modellenmiştir. *Inverse kinematic tool*, her bir hastanın yürüme döngüsü boyunca, eşli kalça ve diz açıları ile ST ve GRA kaslarının kas-tendon birimi uzunlukları verilerini hesaplamak için kullanılmıştır.

III. BULGULAR

Hastaya özgü geliştirilen modeller, çalışılan hasta grubunda, ST ve GRA kasları için kas-tendon birimi uzunluğu değişimlerini elde etmeyi sağlamıştır. Şekil. 1 test edilen 10 bacağın her biri için, bir yürüme döngüsü boyunca ST ve GRA kaslarının kas-tendon birimi uzunluğu değişimini normalize edilmiş şekilde göstermektedir (normalizasyon her bir bacağın kas-tendon birimi uzunluğunun, yürüme döngüsünde gösterdiği en uzun boya bölünmesi ile yapılmıştır). ST ve GRA kasları için bu değişim sırasıyla $\%13.4 \pm 2.8$ ve $\%9.6 \pm 2.5$ 'tir ve en uzun boylar, yürüme döngüsünün salınım sonu evresinde görülmektedir.

Model çalışması, intraoperatif mekanik kuvvet ölçümü yapılan 10 farklı kalça-diz eklem açısı kombinasyonundan hangilerinin yürüme sırasında gözlemlendiğini de ortaya çıkarmıştır. Şekil. 2 örnek bir bacak için, 10 farklı kalça-diz eklem açısı kombinasyonunun karşılık geldiği kas-tendon

birimi uzunluklarını ve bu uzunluklarda ölçülmüş pasif ve aktif kas kuvvetlerini göstermektedir. Yürüme sırasında ortaya çıkan kas-tendon birimi uzunlukları yeşil renkte belirtilmiştir. Tipik olarak, uzayan kas-tendon birimi boyuyla birlikte (ki bu dizin ekstansiyonunu temsil etmektedir) pasif F_{ST} ve F_{GRA} 'nın giderek arttığı, ancak tüm hareket aralığında bu kuvvetlerin, aktif koşulda ölçülen F_{ST} ve F_{GRA} 'dan oldukça düşük olduğu görülmüştür. Bu kuvvetler de ilk defa kas-tendon biriminin boyunun fonksiyonu olarak elde edilmiştir ve her iki kas da kısa boylarda en düşük kuvvetlerini göstermektedir. Kas-tendon birimi boyu arttıkça spastik ST kasının kuvveti giderek artmaktadır. Spastik GRA kası ise artan ve optimal kas kuvvetine ulaştıktan sonra azalan aktif koşul kas kuvvetleri göstermektedir.



Şekil. 1. Spastik ST ve GRA kaslarının, yürüme döngüsü boyunca kas-tendon birimi uzunluğu değişimleri.

IV. TARTIŞMA

Model çalışması, intraoperatif mekanik testlerde elde edilmiş kas kuvveti bilgisi ile hastaların yürüme ilişkilerinin kurulması için bir platform kurmamıza olanak vermiştir. Bu platform, mekanik verinin klinik etkisini görmek bakımından oldukça kullanışlı bir araç oluşturmaktadır.

Önemli bir bulgu olarak, OpenSim analizi, hedef spastik kasların yürüme boyunca gösterdikleri kas-tendon birimi uzunluğu değişimlerinin, hem ST [6] hem GRA kasları için sağlıklı kişilerle benzer olduğunu göstermiştir. Sağlıklı ve aynı zamanda spastik kaslar da en uzun boylarını salınım sonu evresinde göstermektedir. Dolayısıyla, kas-tendon birimi uzunluğu verileri, spastik kasların kısa olduğu beklentisinin aksine klinikte hastaların yürüyüş döngülerinin ilk yüklenme ve son basma evrelerinde açık bir şekilde gözlenen abartılı diz fleksiyonu ve bunun etkisiyle ortaya çıkabilen ayak hareketi bozukluğunu açıklayamamaktadır. Diğer yandan, patolojiyi açıklayabilecek türden bir kısalmış kas gövde uzunluğunun var olup olmadığının tespitinin model çalışması ile mümkün olmadığı not edilmelidir. Buna karşın, intraoperatif kas kuvveti ölçümlerinin, maksimum kas kuvvetlerini ekstansiyon pozisyonlarında yani uzun kas-tendon birimi uzunluklarında göstermiş olması, spastik kasların gövdelerinin sağlıklı kişilere kıyasla kısalmış olmayabileceğine işaret etmektedir.

Maksimum pasif F_{ST} ve F_{GRA} hedef kasın en uzun boyda olduğu durumlarda görülmektedir. Yürüme ilişkili kas-tendon birimi uzunluklarında ilgili kasların toplam tendon kuvvetlerinin baskın bileşeni aktif kuvvetlerdir. Bu durum, SP hastalarında yürüme sırasında açıkça gözlenen eklem hareketi kısıtlarının pasif değil, aktif koşul kas kuvvetleri ile ilişkili olduğuna işaret etmektedir. Ancak, kasların genel kuvvet üretme karakteristiklerinin sağlıklı kasınkine uyumlu olması, tek tek spastik kasların eklem hareketi kısıtlarının belirleyeni olmayabileceğini düşündürmektedir. Kasların eşzamanlı aktivasyonları sonucu bu kısıtlayıcı etki artıyor olabilir.

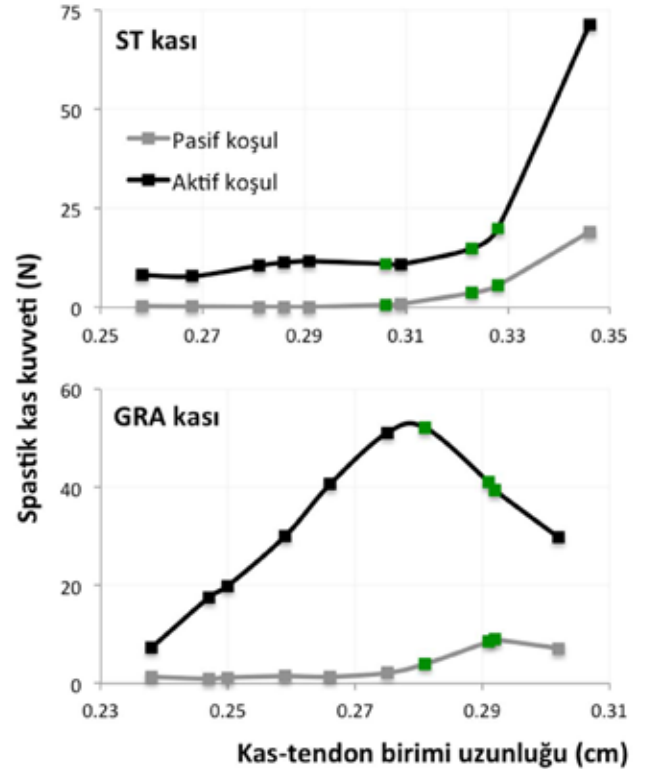
Geliştirilen analiz platformu SP hastalarının eklemlerinde görülen hareket kısıtlarının mekanizmasının anlaşılması ve diğer patolojik koşulların analizleri için önemli bir kullanım alanı sunmaktadır.

BİLGİLENDİRME

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 113S293 numaralı proje kapsamında desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Yucesoy, C. A., Ates, F., Akgun, U. and Karahan, M., "Measurement of human Gracilis muscle isometric forces as a function of knee angle, intraoperatively", *J. Biomech.*, 43: 2665-2671, 2010.
- [2] Ates, F., Temelli, Y., Yucesoy, C.A., "Human spastic Gracilis muscle isometric forces measured intraoperatively as a function of knee angle show no abnormal muscular mechanics". *Clin. Biomech.*, 28: 48-54, 2013.
- [3] Ates, F., Temelli, Y., Yucesoy, C.A., "The mechanics of activated semitendinosus are not representative of the pathological knee joint condition of children with cerebral palsy", *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 28: 130-136, 2016.
- [4] Davis, R.B., Öunpuu, S., Tyburski, D., Gage, J.R., "A gait analysis data collection and reduction technique", *Hum. Mov. Sci.*, 10: 575-587, 1991.
- [5] Delp, S.L., Loan, J.P., Hoy, M.G., Zajac, F.E., Topp, E.L., Rosen, J.M., "An Interactive Graphics-Based Model of the Lower Extremity to Study Orthopaedic Surgical Procedures", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 37: 757-767, 1990.
- [6] van der Krogt, M.M., Doorenbosch, C.A.M., Harlaar, J., "Muscle length and lengthening velocity in voluntary crouch gait", *Gait Posture*, 26: 532-538, 2007.



Şekil 2. Test edilen örnek bir bacak için, spastik ST ve GRA kaslarının, kas-tendon birimi uzunluklarının fonksiyonu olarak ürettikleri pasif ve aktif kuvvetler. Yürüme ilişkili kas-tendon birimi uzunlukları yeşil işaretli belirtilmiştir.