



Serebral Palsili Çocukların Yürüme Karakteristiğinin Biyomekanik Değerlendirmesi

Yunus Ziya Arslan*

* Türk-Alman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Robotlar ve Akıllı Sistemler Bölümü, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-1861-9368), yunus.arslan@tau.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 4 Haziran 2020 ve Kabul Tarihi 12 Ekim 2020)

(DOI: 10.31590/ejosat.747998)

ATIF/REFERENCE: Arslan, Y. Z. (2020). Serebral Palsili Çocukların Yürüme Karakteristiğinin Biyomekanik Değerlendirmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (20), 77-84.

Öz

Serebral palsy (SP), kas iskelet sisteminde pek çok deformiteye neden olan ve çeşitli yürüme patolojileri ile kendini gösteren bir hastalıktır. Bükük diz yürüyüşü en çok karşılaşılan yürüme problemlerinden biridir. SP'li hastaların kinetik ve kinematik parametrelerinin sağlıklı kişilere göre farklılık gösterdiği bilinmektedir. Bu çalışmada, bükük diz yürüyüşüne sahip çocukların eklem kinematiği ve kinetiği ile alt ekstremitte kas kuvvetleri açısından sağlıklı bireylere göre olan farklılıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için OpenSim yazılımı kullanarak SP'li hastaların ve sağlıklı bireylerin yürüme hareketinin analizi yapılmıştır. Ters kinematik analiz ile kalça, diz ve ayak bileği fleksiyon / ekstansiyon açıları elde edilmiştir. Eklem momentlerinin hesaplanması için ters dinamik yöntemi kullanılmıştır. Statik optimizasyon yöntemi ile medial hamstring, biceps femoris, rektus femoris, gastrocnemius ve tibialis anterior kasları için kas kuvvetleri hesaplanmıştır. SP'li hastalardan kaydedilen elektromiyografi (EMG) verisi ile de kestirilen kas aktivasyonlarının zamanlamalarının deneysel veriyle örtüşüp örtüşmediği kontrol edilmiştir. SP'li çocuklarda kalça eklemi fleksiyon / ekstansiyon açısında sağlıklı bireylere göre farklılık gözlenmemektedir. Ancak SP'li çocuklarda diz ve ayak bileği fleksiyon/ektansiyon açılarının sağlıklı bireylerden anlamlı şekilde farklı olduğu belirlenmiştir. Kalça, diz ve ayak bileğindeki fleksiyon/ektansiyon momentleri incelendiğinde maksimum kalça ekstansör momenti ve ikinci diz ekstansör momenti dışındaki diğer bütün parametreler için SP'li hastalar ve sağlıklı bireyler arasında anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. SP'li çocuklarda biceps femoris ve semimembranosus kas kuvvetleri sağlıklı kişilere göre daha yüksek bulunurken, gastrocnemius, rektus femoris ve tibialis anterior kas kuvvetleri daha düşük bulunmuştur. Kestirilen kas kuvvetleri EMG verisi ile karşılaştırıldığında kasların aktivasyon zamanlarının deneysel olarak elde edilen aktivasyon zamanları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Serebral palsy, Bükük diz yürüyüşü, Kas-iskelet sistemi, Yürüme analizi.

Biomechanical Evaluation of Gait Characteristics of the Children with Cerebral Palsy

Abstract

Cerebral palsy (CP) is a disease that causes several deformities in the musculoskeletal system and it is manifested by various gait pathologies. Crouch gait is one of the most common gait problems. It is known that the kinetic and kinematic parameters of the patients with CP differ from healthy individuals. In this study, it was aimed to determine the differences in joint kinematics, joint kinetics, and muscle forces between healthy children and children with crouch gait. To do so, OpenSim was employed for the analysis of the patients with CP and healthy individuals during walking. Flexion/extension angles of the hip, knee, and ankle joints were obtained using the inverse kinematics approach. The inverse dynamics approach was applied for the calculation of the joint moments. Muscle forces of the medial hamstring, biceps femoris, rectus femoris, gastrocnemius, and tibialis anterior were calculated using the static optimization method. It was investigated whether the timings of the theoretically predicted muscle activations match with the experimental data by using electromyography (EMG) data recorded from patients with CP. There was no significant difference in the flexion/extension angle of the hip joint between children with CP and healthy individuals. However, flexion/extension angles of the knee and ankle joints of the children with CP were found to be significantly different from healthy individuals. Significant differences were also found between the patients with CP and healthy individuals for the hip, knee, and ankle joint moments in the sagittal plane.

* Sorumlu Yazar: yunus.arslan@tau.edu.tr

except for the hip extensor moment and second knee extensor moment. While biceps femoris and semimembranosus muscle forces of the children with CP were higher than those of healthy individuals, gastrocnemius, rectus femoris, and tibialis anterior muscle forces were lower. The activation patterns of the calculated muscle forces were found to be compatible with the experimentally obtained activation times.

Keywords: Cerebral palsy, Crouch gait, Musculoskeletal system, Gait analysis.

1. Giriş

Serebral palsi (SP) beyinde oluşan hasarın büyümesiyle birlikte kas-iskelet sisteminde çeşitli deformitelere neden olan bir hastalıktır [1]. Bu değişikliklerin bazıları, spastisite olarak adlandırılan kasın istemsiz kasılması ve kemiklerdeki deformitelere neden olur. Hastaların kas-iskelet sistemlerinde meydana gelen bu değişiklikler çeşitli yürüme patolojileriyle kendini göstermektedir. SP'li hastalarda tanımlanan patolojik yürüme bozuklukları içinde bükük diz yürüyüşü (crouch gait) en sık görülen tiplerden biridir [2, 3]. Bükük diz yürüyüşünün pek çok sebebi vardır. Bunlar hamstring kas grubunun aşırı aktivitesi, kuadriceps kas grubunun zayıflığı, ayak bileği plantar fleksör kaslarının zayıflığı ve kalça fleksör kaslarının aşırı aktivitesi olabilir [4]. Bükük diz yürüyüşüne sahip hastalarda birincil deformite çoğunlukla diz eklemine aşırı fleksiyon şeklinde kendini gösterir [5]. Postürü dengeyi sağlamak için bu durumun hastaların ayak bileği eklemine artmış dorsifleksiyon ve kalça eklemine artmış fleksiyona neden olduğu belirlenmiştir. Birincil deformitenin ayak bileğinde dorsifleksiyon artışından kaynaklanması durumunda ise yer tepki kuvvet vektörünün diz eklemine arkasından ve kalça eklemine önünden geçmesini sağlamak için kalça ve diz eklemlerinde fleksiyon artışı olmaktadır [6]. Her iki durum kendini aynı postür ile gösterse de uygulanacak tedavi yöntemi değişiklik gösterecektir.

SP gibi kas-iskelet sisteminde değişikliklere ve hareket bozukluklarına neden olan hastalıkların biyomekaniğinin doğrulukla anlaşılması, hastalığın ilerleyişini yavaşlatmak ve uygulanacak tedavi yöntemini doğrulukla belirlemek açısından oldukça büyük bir öneme sahiptir. SP'li hastaların yürüme esnasında kinetik (eklem momenti) ve kinematik (eklem açısı) parametrelerinde değişiklikler meydana gelmektedir [7]. Bu parametrelerin belirlenebilmesi için hareket analizi yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Hareket analizi ile yürüme sırasındaki eklem parametrelerine ilişkin bilgi edinilmesinin yanında elektromiyografi (EMG) ile kasların elektriksel aktivasyonları ölçülebilmektedir [8]. EMG kullanılarak kasların aktif olduğu anlar belirlenebilmesine rağmen kas kuvvetleri tespit edilememektedir. Modelleme ve simülasyon programları kas kuvvetlerinin hesaplanabilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır [2, 3]. Bu kapsamda OpenSim yazılımı, kullanıcıların kendi modellerini oluşturma, sistem hareketinin dinamik simülasyonunu yapabileceği ve analiz edilebilir olanağı sunan açık kaynak kodlu bir yazılımdır [9].

SP'li hastaların yürüme sırasındaki kinetik ve kinematik parametrelerindeki değişiklikler hakkında kapsamlı bir literatür bilgisi bulunmakla birlikte, kas koordinasyonları açısından elde edilen bilgi sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı, bükük diz yürüyüşüne sahip SP'li hastaların sağlıklı bireylere göre eklem kinematiği, kinetiği ve kas koordinasyonu açısından farklılıklarını değerlendirmektir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel Protokol

Bu çalışmada, Steele ve diğ.'nin açık kaynak verisinden faydalanılmıştır [10]. Veri kümesi, hafif etkilenimli, spastik, diplejik 8 SP hastasının (yaş: 8.3 ± 1.6 , boy: 1.21 ± 0.11 m, kilo: 26.9 ± 9.2 kg) yürüme analizi ve EMG verisini içermektedir. Çalışmaya dâhil edilme kriterleri; i) basma fazında minimum diz fleksiyon açısının 15° - 40° olması, ii) ayakta ekinus deformitesinin olmaması (klinik muayene esnasında 0° dorsifleksiyon açısının elde edilmiş olması), iii) cerrahi operasyon geçmişi olmaması, iv) iskelet sisteminde önemli deformitelerin olmaması (tibial torsiyon ve femoral anteversiyonun 30° 'den az olması) olarak belirtilmiştir.

Yürüme analizi verisi, 12 kameralı hareket kayıt sistemi (Vicon Motion Systems, Lake Forest, CA) ve 13 marker (belirteç) kullanılarak toplanmıştır. Belirteçler standart protokole göre yerleştirilmiştir. Ayrıca yer tepki kuvveti verisi de eş zamanlı olarak dört kuvvet platformu (AMTI, Watertown, MA) aracılığıyla kaydedilmiştir. Hastalar serbest yürüme hızında yürümüştür (0.92 ± 0.18 m/s). Kalça, diz ve ayak bileği eklemlerinin hareketine katkı sağlayan majör kaslardan EMG sinyalleri kaydedilmiştir (Motion Laboratory Systems, Baton Rouge, LA). Bu kaslar medial hamstring (SM), biceps femoris (BF), rektus femoris (RF), gastrocnemius (GAS) ve tibialis anterior (TA) olarak belirlenmiştir. EMG sinyallerinin örnekleme frekansı 1080 Hz'dir. Sinyaller 20-400 Hz aralığında bant geçiren filtre ile filtrelenmiştir [10].

2.2. Kas-İskelet Sistemi Simülasyonu

SP'li hastaların sağlıklı bireylere göre olan farklılıklarını belirlemek için eklem açıları, eklem momentleri ve kas kuvvetleri hesaplanmıştır. SP'li hastaların kas-iskelet sistemlerinin simülasyonları ve hareket analizi açık kaynak kodlu OpenSim programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, OpenSim'in kütüphanesinde bulunan ve Rajagopal ve diğ. tarafından oluşturulmuş tam vücut kas-iskelet sistemi modeli kullanılmıştır [11]. Kullanılan model 39 serbestlik derecesine, 22 segmente ve 80 kas-tendon birimine sahiptir. Öncelikle genel kas-iskelet sistemi modelinin her bir hastanın antropometrik ölçülerine göre ölçeklendirilmesi yapılmıştır. Bunun için hastaların statik pozda kaydedilen belirteç verisi kullanılmıştır. Ölçeklendirme işlemi haricinde modelin kas parametrelerinde ya da kemik geometrisinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Modelin hastanın ölçülerine uyarlanması işlemi tamamlandıktan sonra belirteçlerin 3 boyutlu pozisyon verisi kullanılarak ters kinematik yöntemi ile yürüme sırasındaki eklem açıları hesaplanmıştır. Analizlerde deneysel ve sanal belirteçler arasındaki hatanın minimize edilmesi amaçlanmıştır ve maksimum belirteç hatası 0.05 olacak şekilde analiz tamamlanmıştır. Yürüme sırasında kaydedilen yer tepki kuvvet vektörü ve eklem açıları dikkate alınarak kalça, diz ve ayak bileğinde momentler ters dinamik yöntemi ile hesaplanmıştır. Kas kuvvetlerinin hesaplanması için statik optimizasyon yöntemi kullanılmıştır [12]. Optimizasyonda amaç fonksiyonu olarak, kasların aktivasyonlarının (a) 2. dereceden

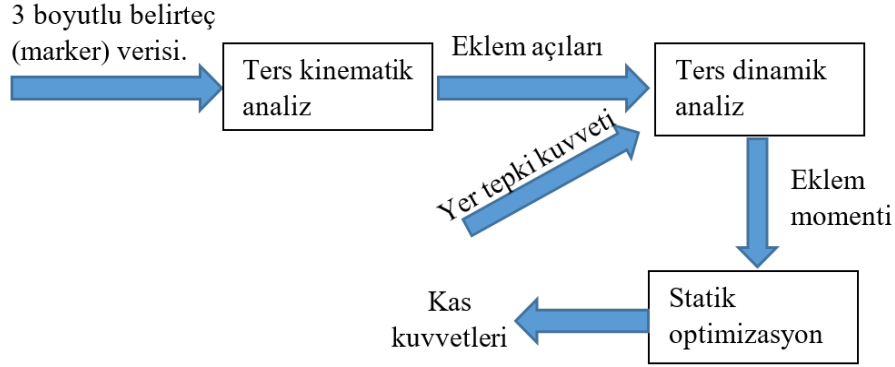
kuvvetlerinin toplamının minimize edilmesini sağlayan fonksiyon kullanılmıştır (Denklem 1) [13].

$$\min\{\sum_{n=1}^k (a_n)^2\} \quad (1)$$

Denklemde, k optimizasyon sırasında dikkate alınan kas sayısını göstermektedir.

Çalışmada kas kuvvetlerini hesaplamak için uygulanan aşamaların özetlendiği akış diyagramı Şekil 1’de gösterilmiştir.

Ayrıca, SP’li hastalardan elde edilen kuvvetlerinin değerlendirilebilmesi için Fukuchi ve diğ.’nin çalışmasında paylaşılan sağlıklı kişilere ait yürüme verisi kullanılmıştır [14]. Bu veri kullanılarak sağlıklı bireylerdeki kas kuvvetleri de OpenSim’deki statik optimizasyon yöntemi ile hesaplanmıştır.



Şekil 1. Çalışmada kas kuvvetlerini hesaplamak için kullanılan yöntemleri gösteren akış diyagramı

2.3. Kas-İskelet Sistemi Simülasyonu

SP’li hastalardan elde edilen kas kuvvetlerinin sağlıklı kişilere göre olan farklılıklarını nicel olarak tespit etmek için sağlıklı ve hasta bireylerin kinematik, kinetik ve kas kuvvetleri sonuçları için ortalama karekök hatası (root mean square difference-RMSD) ve Pearson korelasyon katsayısı (Pearson correlation coefficient-PCC) hesaplanmıştır. RMSD değerinin 0.1 olması incelenen kuvvetler arasındaki ortalama hatanın %1 olduğunu gösterirken, PCC değerinin 0 olması incelenen kuvvetler arasında korelasyon olmadığını belirtmektedir [15].

Hasta bireylerin sağlıklı bireylere göre olan farklılıklarının belirlenmesi için eklem açıları ve eklem momentlerinin istatistiksel analizi yapılmıştır. İstatistiksel analiz için incelenen kinematik ve kinetik veri Tablo 1’de verildiği üzeredir. İstatistiksel farklılık SPSS programı (Versiyon 21.0; SPSS; Chicago, IL; USA) ile değerlendirilmiştir. İstatistiksel anlamlılık seviyesi 0.05 olarak belirlenmiştir. Uygulanacak yönteme karar vermek için verinin normalitesi Shapiro-Wilk testi ile incelenmiştir. Test sonucuna göre normalitenin sağlanmadığı belirlenmiştir ($p < 0.05$). Bu nedenle verilerin istatistiksel olarak

değerlendirilmesi için non-parametrik bir test olan Mann-Whitney U yöntemi kullanılmıştır.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

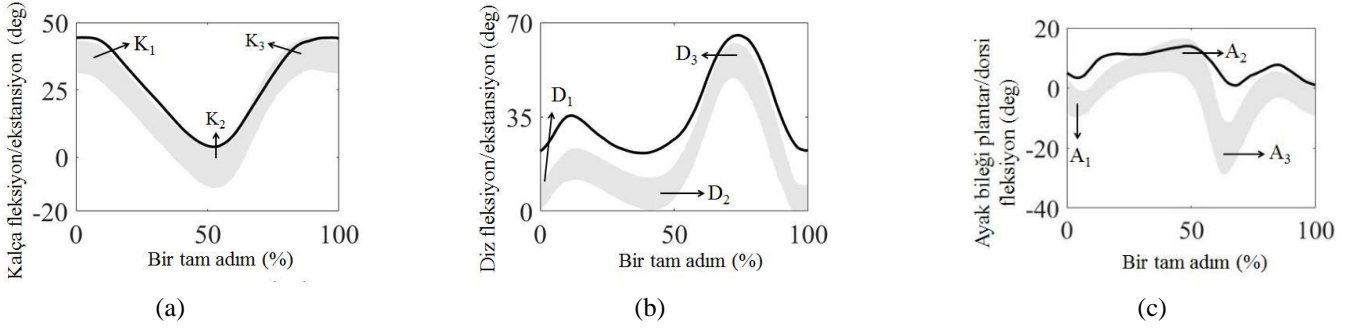
SP’li hastaların kalça, diz ve ayak bileği eklemlerine ait sagittal düzlemdeki ortalama eklem açı değerleri Şekil 2’de verilmiştir. Tablo 1’de verilen tanımlamalar da şekil üzerinde gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar bir tam yürüme adımına göre normalize edilerek verilmiştir. Ayrıca aynı şekil üzerinde eklem açılarının sağlıklı bireyler için literatürden elde edilen normal değer aralığı gri alan olarak gösterilmiştir [7]. Böylece hasta bireylere ait eklem açılarının sağlıklı bireylere göre nasıl farklılaştığı daha kolay anlaşılabilir.

Tablo 1. İstatistiksel Analiz için Seçilen Kinematik ve Kinetik Veri

Kinematik		Kinetik	
K_1	Topuk vuruşundaki maksimum kalça fleksiyonu	K_{m1}	Maksimum kalça ekstansör momenti
K_2	Basma fazındaki maksimum kalça ekstansiyonu	K_{m2}	Maksimum kalça fleksör momenti
K_3	Salınım fazındaki maksimum kalça fleksiyonu	D_{m1}	İlk diz ekstansör momenti
D_1	Topuk vuruşundaki maksimum diz fleksiyonu	D_{m2}	Maksimum diz fleksör momenti
D_2	Basma fazındaki maksimum diz ekstansiyonu	D_{m3}	İkinci diz ekstansör momenti
D_3	Salınım fazındaki maksimum diz fleksiyonu	A_{m1}	Maksimum ayak bileği dorsifleksör momenti
A_1	Topuk vuruşundan sonraki ayak bileği plantar fleksiyonu	A_{m2}	Maksimum ayak bileği plantar fleksör momenti
A_2	Maksimum ayak bileği dorsifleksiyonu		
A_3	Maksimum ayak bileği plantar fleksiyonu		

Kalça eklem açısının karakteristiğinin sağlıklı veriyle uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 2a). SP'li çocukların topuk vuruş anındaki diz eklem açısı (D_1), basma fazındaki maksimum diz ekstansiyon açısı (D_2) ve salınım fazındaki maksimum diz fleksiyon açısı (D_3) normal veriye göre daha yüksektir (Şekil

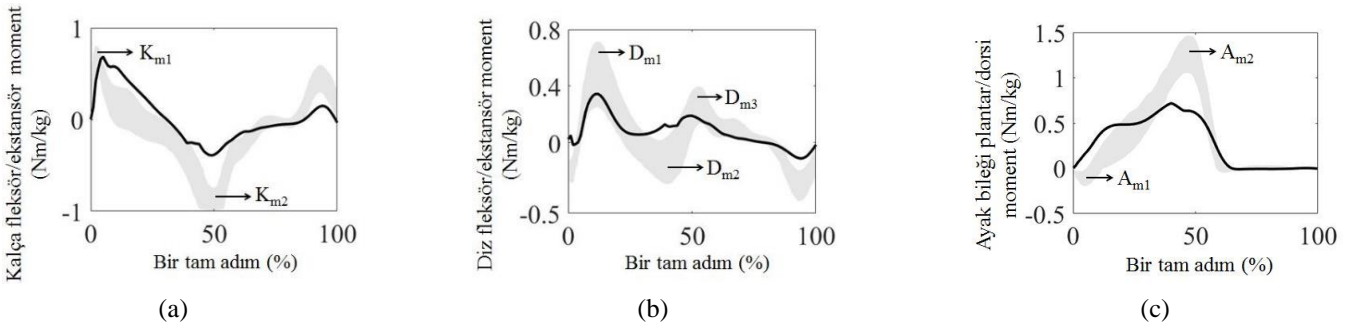
2b). Ayak bileği ekleminin genel davranışı normal veriye göre farklılık göstermektedir (Şekil 2c). SP'li çocuklarda basma fazı boyunca dorsifleksiyon açısının sağlıklı bireylere göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Bükük diz yürüyüşüne sahip hastaların eklem açılarının değişimi. a) kalça eklemi fleksiyon/ekstansiyon açısı, b) diz eklemi fleksiyon/ekstansiyon açısı, c) ayak bileği plantar fleksiyon/dorsifleksiyon açısı.

Hastaların kalça, diz ve ayak bileği eklemlerine ait moment değerleri Şekil 3'de verildiği üzeredir. SP'li çocuklarda her üç moment grafiğinin genel karakteri sağlıklı veriyle benzerlik göstermektedir. Ancak ayak bileği ekleminde basma fazı başlangıcında dorsifleksör momentinin eksik olduğu görülmektedir. Hasta bireylerde maksimum kalça fleksör momentini (K_{m2}) normal veriye göre daha düşüktür (Şekil 3a).

SP'li çocuklarda ilk diz ekstansör momentini (D_{m1}) ve maksimum diz fleksör momentini (D_{m2}) değişkenlerinin sağlıklı bireylere göre daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 3b). Ayrıca hasta bireylerde maksimum ayak bileği dorsifleksör moment değeri (A_{m1}) sağlıklı bireylere göre daha yüksekken, maksimum ayak bileği plantar fleksör moment (A_{m2}) değerinin daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 3c).



Şekil 3. Bükük diz yürüyüşüne sahip hastaların eklem momentlerinin değişimi. a) kalça eklemi fleksör/ekstansör momentini, b) diz eklemi fleksör/ekstansör momentini, c) ayak bileği plantar fleksör/dorsifleksör momentini.

Hastaların kalça, diz ve ayak bileği eklemlerine ait kinematik ve kinetik değişkenlerin normal veriyle istatistiksel olarak karşılaştırılması Tablo 2'de verilmiştir. Karşılaştırma yapılırken normal verinin ortalama değerleri dikkate alınmıştır. SP'li çocuklarda topuk vuruşundaki maksimum kalça fleksiyonu (K_1), basma fazındaki maksimum kalça ekstansiyonu (K_2) ve salınım fazındaki maksimum kalça fleksiyonu (K_3) istatistiksel olarak farklılık göstermemektedir ($p>0.05$). Hastalarda diz eklemi kinematiği incelendiği zaman topuk vuruşundaki maksimum diz fleksiyonun (D_1), basma fazındaki maksimum diz ekstansiyonun (D_2) ve salınım fazındaki maksimum diz

fleksiyonun (D_3) sağlıklı kişilerden daha yüksek olduğu görülmektedir ($p<0.05$). Hastaların topuk vuruşundan sonraki ayak bileği plantar fleksiyonu (A_1) ve maksimum ayak bileği plantar fleksiyonu (A_3) sağlıklı kişilere göre daha yüksek bulunurken ($p<0.05$), maksimum ayak bileği dorsifleksiyonunun (A_2) normal veriden anlamlı derecede farklı olmadığı belirlenmiştir ($p>0.05$). Kinetik değişkenler incelendiğinde görülmektedir ki SP'li çocuklarda kalça ekleminde maksimum kalça ekstansör momentini (K_{m1}) ve diz ekleminde ikinci diz ekstansör momentini (D_{m3}) haricindeki bütün değişkenler sağlıklı bireylere göre istatistiksel olarak farklıdır ($p<0.05$).

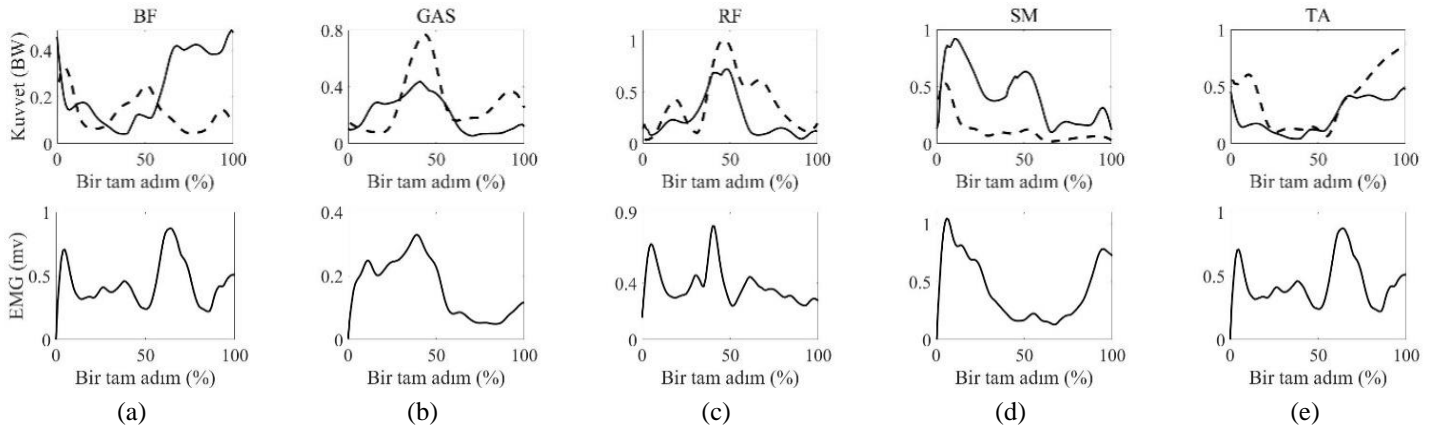
Tablo 2. Kinematik ve Kinetik Verinin İstatistiksel Analiz Sonuçları

	Kinematik					Kinetik					
	SP'li hastalar	Ort	Min	Mak	<i>p</i>	SP'li hastalar	Ort	Min	Mak	<i>p</i>	
K_1	44.36	37.29	31.35	43.22	-	K_{m1}	0.69	0.61	0.41	0.81	-
K_2	4.25	-4.11	-11.09	2.94	-	K_{m2}	-0.39	0.87	-0.74	-0.99	0.021
K_3	43.21	37.52	30.48	44.05	-	D_{m1}	0.34	0.48	0.25	0.71	0.042
D_1	22.28	6.24	1.12	11.35	0.035	D_{m2}	0.05	-0.14	-0.29	0.03	0.038
D_2	21.55	6.37	0.24	12.51	0.032	D_{m3}	0.19	0.25	0.12	0.38	-
D_3	65.38	56.18	50.01	63.35	0.043	A_{m1}	0.01	-0.11	-0.19	-0.02	0.044
A_1	4.45	-5.23	-9.51	0.946	0.042	A_{m2}	0.71	1.27	1.06	1.47	0.026
A_2	13.88	10.51	4.58	16.42	-						
A_3	1.15	-20.08	-28.78	-11.37	0.026						

Ort: Ortalama; Min: Minimum, Mak: Maksimum, *p*: istatistik anlamlılık değeri

SP'li hastalardan elde edilen ortalama kas kuvvetleri Şekil 4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçların kişinin ağırlığından bağımsız değerlendirilebilmesi için kuvvet değerleri vücut ağırlığına (body weight-BW) normalize edilmiştir. Hastalardan kaydedilen EMG verisi de Şekil 4'te gösterilerek kestirilen kas aktivasyonlarının zamanlamalarının deneysel veriyle örtüşüp örtüşmediği kontrol edilmiştir. Sağlıklı bireylerden elde edilen kas kuvvetleri de aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Kas kuvveti sonuçları kontrol edildiğinde SP'li çocuklarda biceps femoris kasının salınım fazında sağlıklı kişilere göre daha fazla kuvvet ürettiği görülmektedir. Hastaların gastroknemius kası basma fazı başlangıcında sağlıklı kişilere göre daha fazla kuvvet üretirken, basma ortasından itibaren sağlıklı kişilere göre daha az kuvvet

üretmiştir. SP'li çocukların rektus femoris kasının ise sağlıklı kişilere göre daha az kuvvet ürettiği görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere SP'li bireylerde semimembranosus kas kuvveti yürüme boyunca sağlıklı kişilere göre daha fazla kas kuvveti üretmektedir. Tibialis anterior kasına bakıldığında SP'li çocuklar basma fazı başlangıcında ve salınım fazı boyunca sağlıklı kişilere göre daha az kas kuvveti üretmektedir. Kestirilen kas kuvvetlerinin aynı kasların deneysel olarak elde edilen aktivasyon zamanları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Sadece rektus femoris kasında basma fazı başlangıcında aktivasyon gözlenmesine rağmen kas kuvvetinin düşük olduğu ve semimembranosus kasında basma ortasında düşük aktivasyon olmasına rağmen yüksek kas kuvveti olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. Büyük diz yürüyüşüne sahip hastaların kas kuvvetleri ve EMG sinyalleri. a) BF: biceps femoris, b) GAS: gastroknemius, c) RF: rektus femoris, d) SM: semimembranosus, e) TA: tibialis anterior. Düz siyah çizgi (—): SP'li hastalar. Kesikli siyah çizgi (---): sağlıklı bireyler.

SP'li hastalardan ve sağlıklı kişilerden elde edilen kas kuvvetleri için hesaplanan RMSD ve PCC değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Her kas için RMSD değerleri 0.20'nin üzerindedir. Tibialis anterior hariç diğer kasların PCC değerleri 0.80'nin

altındadır. En düşük RMSD değeri 0.35 ile rektus femoris kasından elde edilirken, en büyük fark 1.09 ile semimembranosus kasında ortaya çıkmıştır. En düşük PCC değeri 0.38 ile BF kasından, 0.83 ile TA kasından elde edilmiştir.

Tablo 3. SP'li ve Sağlıklı Kişiler için Hesaplanan Kas Kuvvetlerinin Ortalama RMSD ve PCC Değerleri

	BF	GAS	RF	SM	TA
RMSD	0.56	0.49	0.35	1.09	0.37
PCC	0.38	0.65	0.78	0.55	0.83

4. Sonuç

SP'li hastaların kinetik ve kinematik parametrelerinin sağlıklı kişilere göre farklılık gösterdiği bilinmektedir [16]. Bu çalışmada bükük diz yürüyüşüne sahip SP'li hastaların eklem kinetiği, eklem kinematiği ve kas kuvvetlerinin sağlıklı bireylere göre olan farklılıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

4.1. Eklem Açıları

Kinematik sonuçlar incelendiğinde, SP'li hastaların kalça eklemine ait her üç parametre (topuk vuruşundaki maksimum kalça fleksiyonu K_1 , basma fazındaki maksimum kalça ekstansiyonu K_2 , salınım fazındaki maksimum kalça fleksiyonu K_3) için normal veri dikkate alındığında istatistiksel bir farklılık tespit edilmemiştir ($p>0.05$). Bu çalışmaya dahil edilen hastalar hafif etkilenimli SP hastaları olduğu için K_1 , K_2 ve K_3 parametreleri normal veriden anlamlı derecede farklı çıkmamıştır ve bu sonuç Hicks ve diğ.'nin çalışmasıyla da uyumludur [6]. Hicks ve diğ.'nin çalışması göstermiştir ki hafif etkilenimli bükük diz yürüyüşü karakteristiğine sahip hastalarda kalça fleksiyon açısı sağlıklı bireylere göre farklılık göstermemektedir. Ancak bükük diz yürüyüşünün şiddeti arttıkça kalça eklemi fleksiyon açısı da hastalığın karakterine uygun şekilde artmaktadır. Topuk vuruşundaki maksimum diz fleksiyonu (D_1) değerinin normale göre daha yüksek bulunması ($p<0.05$) hastanın topuk vurma anında bükük diz yürüyüşü karakterine sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 2b). Ayrıca hastaların basma fazındaki minimum diz fleksiyon açısı (maksimum diz ekstansiyon açısı) ve salınım fazındaki maksimum diz fleksiyon açısı sağlıklı kişilere göre daha yüksektir ($p<0.05$). Bu sonuç, literatürdeki diğer çalışmalara benzer olarak hastaların diz eklemine yürüme boyunca aşırı fleksiyonda olduğunu göstermektedir [17, 18]. Yürüme boyunca diz eklemine fleksiyon açısındaki artış bükük diz yürüyüşünün karakterini doğrudan yansıtmaktadır. SP'li hastalarda ayak bileği eklemine normal veriden farklı bir karaktere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 2c). Basma fazı başlangıcında dorsifleksiyon açısının ve topuk vuruşundan sonraki ayak bileği plantar fleksiyonun (A_1) sağlıklı veriye göre daha yüksek olması, diz fleksiyon açısındaki artışa bağlı olarak ayak bileğinin dorsifleksiyon açısında artışa işaret etmektedir. Ayrıca SP'li hastalarda sağlıklı bireylerden farklı olarak basma fazını takip eden plantar fleksiyonun hemen ardından dorsifleksiyon hareketi meydana gelmektedir. Basma fazında iki dorsifleksiyon tepesi (double bump) olarak kendini gösteren bu davranış, hastalarda sıçrama yürüyüşü (bounce gait) karakteri olduğunu da göstermektedir. Bükük diz yürüyüşünün karakteristik belirtilerinden biri olan sıçrama yürüyüşü, plantar fleksör kasların refleksif kasılması nedeniyle meydana gelmektedir [6, 19, 20].

4.2. Eklem Momentleri

Kinematik sonuçlar göstermektedir ki SP'li hastalarda basma fazında kalça ekstansör momenti sağlıklı bireylerden farklılık göstermezken, salınım fazında kalça fleksör momenti sağlıklı

bireylere göre anlamlı derecede azalma göstermektedir. Bu sonuç literatürle uyumludur [3]. Klinik açıdan değerlendirildiği zaman özellikle salınım fazında kalça fleksör momentinin azalma eğiliminde olması, hastaların daha fazla kalça ekstansör momentine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Kalça fleksör kasları, kuadricepsler, aynı zamanda diz ekstansör kasları olarak rol oynamaktadır. Kuadriceps kas grubundaki zayıflığın bükük diz yürüyüşünün temel sebeplerinden biri olduğu bilinmektedir [21]. Hasta kişilerde diz fleksör momentinin salınım fazında sağlıklı bireylere göre daha düşük olması da diz ekstansör momentine ihtiyaç duyulduğuna işaret etmektedir. Bu sonuç, kalça eklemine bulguyla da uyumludur. Literatürde de bükük diz yürüyüşünün tedavisi için diz ekstansör momentinin artırılması en etkin tedavi yollarından biri olarak sıklıkla önerilmektedir [22]. SP'li hastaların ayak bileği eklem momenti incelendiğinde sağlıklı bireylerden farklı olarak basma fazı başlangıcında maksimum dorsifleksör momentin eksik olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar, bu durumun sıçrama yürüyüşü (bounce gait) sebebiyle oluştuğunu göstermektedir [3, 23]. Ayak bileği eklem açısı incelendiğinde yukarıda da açıklandığı üzere hastalarda sıçrama yürüyüşü olduğu görülmektedir (Şekil 2c). Bu patoloji plantar fleksör kasların refleksif kasılması ile ilgili olup, basma fazı başlangıcındaki dorsi fleksör momentin oluşmasına engel olmaktadır [24].

4.3. Kas Kuvvetleri

Literatürde bükük diz yürüyüşünün birincil sebepleri arasında diz fleksör kaslarının aşırı aktivitesi yer almaktadır [6]. Özellikle hamstring kas grubunun aktivitesinin diz ekstansiyonunda azalmaya neden olduğu bilinmektedir. Kuvvet sonuçları incelendiğinde BF ve SM kas kuvvetlerinin SP'li çocuklarda sağlıklı bireylere göre daha yüksek olduğu (Şekil 4, Tablo 3) ve bununla uyumlu olarak önceden belirtildiği üzere SP'li çocuklarda diz ekstansiyon açısının sağlıklı bireylere göre daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 3, Tablo 2). Steele ve diğ.'nin çalışması bükük diz yürüyüşüne sahip hastalarda kuadriceps kas grubunun da hamstringler gibi aktif olması gerektiğini, aksi takdirde hastalığın şiddetinin arttığını göstermiştir [3]. Bu çalışmadaki hasta grubu hafif etkilenimli olduğu için hasta ve sağlıklı kişilerin rektus femoris kas kuvvetleri arasındaki fark düşük çıkmıştır (Tablo 3). Diz fleksör kası olan gastrocnemius SP'li çocuklarda daha az kuvvet üretmiştir. Bunun sebeplerinden biri gastrocnemius kasının aynı zamanda ayak bileği plantar fleksör kası olmasıdır. Gage, ayak bileği plantar fleksör kaslarındaki zayıflığın bükük diz yürüyüşüne neden olduğunu belirtmiştir [4]. Ayak bileği plantar fleksör momentindeki azalma ile bu sonucun uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 3c). Ayrıca gastrocnemius kasının basma fazı başlangıcındaki normalden farklı aktivitesi parmak ucu yürüyüşüne neden olmaktadır (Şekil 2c). SP'li çocuklarda tibialis anterior kas kuvveti sağlıklı bireylere göre daha düşüktür. Hasta bireylerde ayak bileği dorsifleksör momentinin, basma fazının başlangıcı haricinde, sağlıklı verilerden daha düşük olmadığı görülmektedir (Şekil 3c). Dolayısıyla tibialis anterior kas kuvvetindeki bu azalma, literatürde de belirtildiği üzere,

plantar fleksör kaslardaki kuvvet azalmasının kompanzasyonu sonucunda oluşmuştur [25].

4.4. Kısıtlar

Çalışmanın sonuçları değerlendirilirken kısıtlarının da belirtilmesi gerekmektedir. Bunlardan bir tanesi, OpenSim kütüphanesinde mevcut olan ve bu çalışmada kullanılan kas-iskelet sistemi modelinin, çalışmada dikkate alınan tüm hasta ve sağlıklı bireylerin kas-iskelet sistemi yapılarını tam doğrulukla temsil edemeyeceği gerçeğidir. Çünkü her insan vücudu farklı antropometrik özelliklere ve kas-iskelet sistemine sahiptir. Dolayısıyla her insana özgün olan fizyolojik karakteristiğinin genelleştirilmiş bir vücut modeli aracılığıyla tüm gerçekliği ile temsil edilebilmesi mümkün değildir. Bununla birlikte EMG ölçümü yapılan kas sayısının artırılması, sağlıklı ve hasta bireylerin kas koordinasyon farklılıklarının, daha fazla kas grubu için de değerlendirilebilmesine olanak sağlayacaktır. Bundan sonraki çalışmada, kas-iskelet sistemi modeli hastalar için özelleştirilecek ve sağlıklı ve hasta kişiler arasındaki kas koordinasyonu farkı, özelleştirilmiş modeller kullanılarak değerlendirilecektir.

Sonuç olarak, SP'li çocuklarda kalça eklemi fleksiyon / ekstansiyon açısında sağlıklı bireylere göre farklılık gözlenmemiştir. Ancak SP'li çocuklarda diz ve ayak bileği fleksiyon/ektansiyon açılarının sağlıklı bireylerden anlamlı şekilde farklı olduğu belirlenmiştir. Maksimum kalça ekstansör momenti ve ikinci diz ekstansör momenti dışındaki diğer bütün parametreler için SP'li hastalar ve sağlıklı bireyler arasında anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. SP'li çocuklarda biceps femoris ve semimembranosus kas kuvvetleri sağlıklı kişilere göre daha yüksek bulunurken, gastroknemius, rektus femoris ve tibialis anterior kas kuvvetleri daha düşük bulunmuştur. Kestirilen kas kuvvetleri EMG verisi ile karşılaştırıldığında kasların aktivasyon zamanlarının deneysel olarak elde edilen aktivasyon zamanları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmamızda ortaya konulan bulguların, SP'li çocuklar için uygulanan tedavi yöntemlerinin etkilerinin objektif bir açıdan değerlendirilebilmesine katkı sağlayacağı beklenmektedir.

Kaynakça

- [1] Bar-On, L., Molenaers, G., Aertbelien, E., Monari, D., Feys, H., & Desloovere K. (2014). The relation between spasticity and muscle behavior during the swing phase of gait in children with cerebral palsy. *Research in Developmental Disabilities*, 35, 3354–3364. DOI: 10.1016/j.ridd.2014.07.053
- [2] Correa, T. A., Schache, A. G., Graham, H. K., Baker, R., Thomason, P., & Pandy, M. G. (2012). Potential of lower-limb muscles to accelerate the body during cerebral palsy gait. *Gait & Posture*, 36, 194–200. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2012.02.014
- [3] Steele, K. M., van der Krogt, M. M., Schwartz, M. H., & Delp, S. L. (2012). How much muscle strength is required to walk in a crouch gait? *Journal of Biomechanics*, 45, 2564–2569. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2012.07.028
- [4] Gage, J. R. (1990). Surgical treatment of knee dysfunction in cerebral palsy. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 253, 45–54. PMID: 2317990
- [5] Sutherland, D. H., & Davids, J. R. (1993). Common gait abnormalities of the knee in cerebral palsy. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 288, 139–147. PMID: 8458127
- [6] Hicks, J. L., Schwartz, M. H., Arnold, A. S., & Delp, S. L. (2008). Crouched postures reduce the capacity of muscles to extend the hip and knee during the single-limb stance phase of gait. *Journal of Biomechanics*, 41, 960–967. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2008.01.002
- [7] Sangeux, M., & Armand, S. (2015). Kinematic deviations in children with cerebral palsy. In F., Canavese & J., Deslandes (Ed.). *Orthopedic management of children with cerebral palsy: A comprehensive approach* (pp. 241–256). New York, NY: Nova Science Publishers Inc.
- [8] De Luca, C. J. (2002). Surface electromyography: Detection and recording. *DelSys Incorporated*, 10, 1–10. <https://www.delsys.com/downloads/TUTORIAL/semg-detection-and-recording.pdf>
- [9] Delp, S. L., Anderson, F. C., Arnold, A. S., Loan, P., Habib, A., John, C. T., Guendelman, E., & Thelen, D. G. (2007). OpenSim: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 54, 1940–1950. DOI: 10.1109/TBME.2007.901024
- [10] Steele, K. M., Seth, A., Hicks, J. L., Schwartz, M. S., & Delp, S. L. (2010). Muscle contributions to support and progression during single-limb stance in crouch gait. *Journal of Biomechanics*, 43, 2099–2105. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2010.04.003
- [11] Rajagopal, A., Dembia, C., DeMers, M., Delp, D., Hicks, J., & Delp, S. (2016). Full body musculoskeletal model for muscle-driven simulation of human gait. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 63, 2068–2079. DOI: 10.1109/TBME.2016.2586891
- [12] Arslan, Y. Z., Jinha, A., Kaya, M., & Herzog, W. (2013). Prediction of muscle forces using static optimization for different contractile conditions. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 13, 1350022. DOI: 10.1142/S021951941350022X
- [13] Anderson, F. C., & Pandy, M. G. (2001). Static and dynamic optimization solutions for gait are practically equivalent. *Journal of Biomechanics*, 34, 153–161. DOI: 10.1016/S0021-9290(00)00155-X
- [14] Fukuchi, C. A., Fukuchi, R. K., & Duarte, M. (2018). A public dataset of overground and treadmill walking kinematics and kinetics in healthy individuals. *PeerJ*, 6, e4640. DOI: 10.7717/peerj.4640
- [15] Arslan, Y. Z., Adli, M. A., Akan, A., & Baslo, M. (2010). Prediction of externally applied forces to human hands using frequency content of surface EMG signals. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 20, 36–44. DOI: 10.1016/j.cmpb.2009.08.005
- [16] Johnson, D. C., Damiano, D. L., & Abel, M. F. (1997). The evolution of gait in childhood and adolescent cerebral palsy. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 17, 392–396. DOI: 10.1097/01241398-199705000-00022
- [17] Steele, K. M., Damiano, D. L., Eek, M. N., Unger, M., & Delp, S. L. (2012). Characteristics associated with improved knee extension after strength training for individuals with cerebral palsy and crouch gait. *Journal of Pediatric Rehabilitation Medicine*, 5, 99–106. DOI: 10.3233/PRM-2012-0201
- [18] Klotz, M. C. M., Krautwurst, B. K., Hirsch, K., Niklasch, M., Maier, M. W., Wolf, S. I., & Dreher, T. (2018). Does additional patella tendon shortening influence the effects of multilevel surgery to correct flexed knee gait in cerebral

- palsy: A randomized controlled trial. *Gait & Posture*, 60, 217–224. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2017.12.004
- [19] Putz, C., Wolf, S. I., Mertens, E. M., Geisbusch, A., Gantz, S., Braatz, F., Döderlein, L., & Dreher, T. (2017). Effects of multilevel surgery on a flexed knee gait in adults with cerebral palsy. *The Bone and Joint Journal*, 9, 9-B (1256-64). DOI: 10.1302/0301-620X.99B9.BJJ-2016-1155.R1
- [20] Sossai, R., Vavken, P., Brunner, R., Camathias, C., Graham, H. K., & Rutz, E. (2015). Patellar tendon shortening for flexed knee gait in spastic diplegia. *Gait & Posture*, 41, 658-665. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2015.01.018
- [21] Lotman, D.B. (1976). Knee flexion deformity and patella alta in spastic cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 18, 315–319. DOI: 10.1111/j.1469-8749.1976.tb03653.x
- [22] Lenhart, R. L., Brandon, S. C. E., Smith, C. R., Novacheck, T. F., Schwartz, M. H., & Thelen, D. G. (2017). Influence of patellar position on the knee extensor mechanism in normal and crouched walking. *Journal of Biomechanics*, 51, 1–7. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2016.11.052
- [23] Ma, Y., Liang, Y., Kang, X., Shao, M., Siemelink, L., & Zhang, Y. (2019). Gait characteristics of children with spastic cerebral palsy during inclined treadmill walking under a virtual reality environment. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2019, 1-9. DOI: 10.1155/2019/8049156
- [24] Lin, C. J., Guo, L. Y., Su, F. C., Chou, Y. L., & Cherng, R. J. (2000). Common abnormal kinetic patterns of the knee in gait in spastic diplegia of cerebral palsy. *Gait & Posture*, 11, 224-232. DOI: 10.1016/S0966-6362(00)00049-7
- [25] Blazkiewicz, M., & Wit, A. (2018). Compensatory strategy for ankle dorsiflexion muscle weakness during gait in patients with drop-foot. *Gait & Posture*, 68, 88–94. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.11.011