



Üç boyutlu bilgisayarlı yürüme analizi: kinematik ve kinetik

The 3 dimensional computed gait analysis: kinematics and kinetics

Kubilay Beng¹, Sebahat Aydil², Pınar Özkan²

¹Baltalimanı Kemik Hastalıkları Eğitim ve Araştırma Hastanesi, İstanbul

²Baltalimanı Kemik Hastalıkları Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Yürüme Analizi Laboratuvarı, İstanbul

Üç boyutlu bilgisayarlı yürüme analizi, yürüyüş bozukluklarının daha objektif değerlendirilmesine olanak sağlar. Bilgisayarlı yürüme analizi ile kinematik, kinetik; dinamik EMG grafikleri ile zaman ve mesafe parametreleri elde edilir. Eklem kinematik grafikleri hastanın hareket paterninin objektif olarak değerlendirilmesine, primer patolojiler ile bu primer patolojilere sekonder gelişen kompensatuvar mekanizmaların ayırt edilmesini sağlar. Eklem kinetik grafikleri ise hareketi oluşturan mekanizmaları ortaya koyar. Bilgisayarlı yürüme analizi ile, yürüme bozukluklarıyla seyreden nöromusküler hastalıklarda tedavi algoritmaları belirlenebilir ve tedavinin etkinliği değerlendirilebilir. Günümüzde bilgisayarlı yürüme analizinin klinik kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu derlemede; normal yürüme döngüsü, üç boyutlu bilgisayarlı yürüme analizi sistemi ve yürüme analizi sistemi ile elde edilen veriler tanımlanmıştır.

Anahtar sözcükler: bilgisayar yardımlı analiz; yürüme; kinematik bilimi; hızbilim

Three-dimensional computerized gait analysis allows a more objective assessment of gait disorders. Computerized gait analysis covers kinematics analysis and kinetic analysis; dynamic EMG graphs include time and distance parameters. Joint kinematics graphs provide objective assessment of the patient ambulatory patterns, and allow differentiation between the primary pathologies and compensatory mechanisms which develop secondary to these primary pathologies. Joint kinetics graphs provide information about the mechanisms that produce movement. With the computed gait analysis, treatment algorithms can be identified, and effectiveness of the treatment of the neuromuscular diseases with gait abnormalities can be evaluated. Nowadays, computerized gait analysis in clinical practice is becoming increasingly popular. In this review; normal gait cycle, three-dimensional computerized gait analysis system, and the data obtained with this system are described.

Key words: computer assisted analysis; gait; kinematics; kinetics

GİRİŞ

Yürüyüş, canlıların bir yerden bir yere gitmek için doğal olarak yaptıkları hareketler bütünüdür ve kollar, gövde, bacakların simetrik, ritmik ve fazla enerji gerektirmeyen hareketleri ile karakterizedir.^[1] Normal bir yürüme için santral ve periferik sinir sistemi, lokomotor sistem birbirleriyle ve görsel, propriyoseptif, kognitif, kardiyovasküler sistemlerle uyum içinde çalışmalıdır. Bu sistemlerde oluşan herhangi bir patoloji yürüme bozukluklarına neden olabilir.^[2]

Kas iskelet sistemi hastalıklarının tanı ve tedavisinin planlanması, tedavi sonucunun değerlendirilmesi ve izlenmesi amacıyla yürüme analizinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle serebral palsi gibi nöromusküler hastalıklar, muskuloskeletal, kas ve

nörolojik hastalıkların tanı ve tedavisinde üç boyutlu yürüme analizi objektif değerlendirme olanağı sunmaktadır.^[3]

NORMAL YÜRÜME

Yürüme esnasında gövdeyi ilerletebilmek için alt ekstremitelerde bir dizi hareket zinciri oluşur. Belirli düzende tekrarlayan bu hareketler zincirine “yürüme döngüsü” adı verilir.^[1-3] Her yürüme döngüsü ise iki ana bölümden oluşur. Ayağın yerle temas halinde olduğu, ağırlık taşınan döneme basma fazı, vücudun ilerlemesini sağlamak için ayağın havada olduğu döneme ise salınım fazı adı verilir. Bir ayağın yere değdiği an basma fazı başlar, yerden temasının kesildiği an ise basma fazı biter ve salınım fazı başlar.^[3-5]

Basma fazı

Basma fazı sağlıklı bir insanda yürüme döngüsünün %62'sini oluşturur ve beş fonksiyonel alt faza ayrılır. Bu fazlar ilk temas, yüklenmenin kabulü, basma ortası, basma sonu ve salınım öncesi fazlarıdır. Yürüme döngüsünde her iki ayağın yerle temas halinde olduğu döneme çift destek fazı, tek ayağın yerde olduğu döneme ise tek destek fazı denir. Çift destek fazı, basma fazının başında ve sonunda olmak üzere yürüme döngüsünde iki kez oluşur. Yürüme hızı arttıkça çift destek fazının süresi kısalır, yürümeden koşmaya geçildiğinde ise çift destek fazı ortadan kalkar (Şekil 1).

Salınım fazı

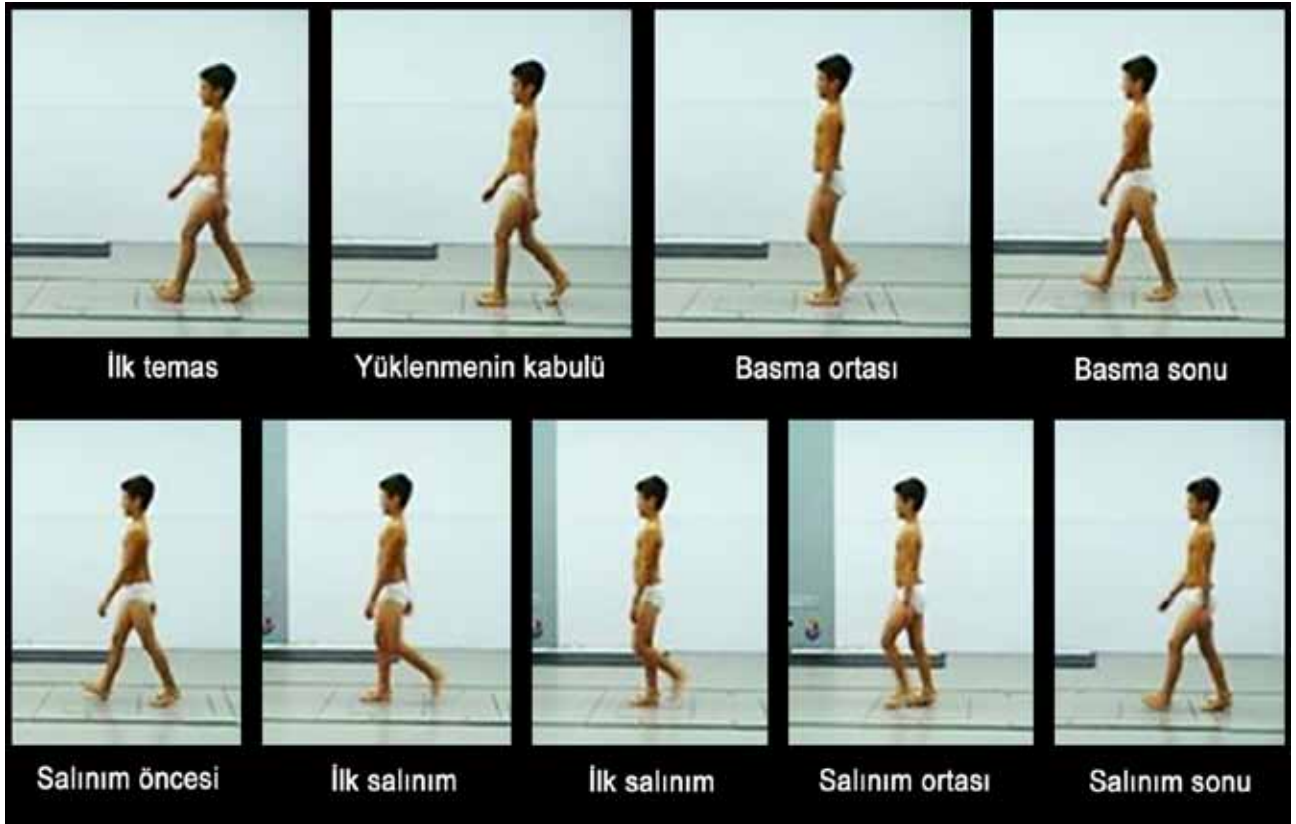
Yürüme döngüsünün %62-100'lük bölümünü oluşturur. Ayağın yerden kaldırılmasıyla başlar, diğer ayağın yere temas etmesiyle biter. Salınım fazı üç alt fazdan oluşur. Bu fazlar; ilk salınım, salınım ortası ve salınım sonu fazlarıdır (Şekil 1).

Yürümenin ve yürüme analizinin temel prensiplerini anlayabilmek için zaman ve mesafe parametrelerinin bilinmesi gereklidir:

1. **Adım uzunluğu:** Bir ayağın yere temas ettiği ilk nokta ile diğer ayağın yere temas ettiği ilk nokta arasındaki mesafedir.
2. **Çift adım uzunluğu:** Yürüme döngüsünde aynı ayağın iki topuk vuruşu arasındaki mesafedir.
3. **Adım genişliği:** Her iki ayağın topuklarının yere değdiği noktalar arasındaki uzaklıktır.
4. **Kadans:** Bir dakikadaki adım sayısıdır.

BİLGİSAYARLI YÜRÜME ANALİZİ

Yürüme analizi; yürüme problemlerinin değerlendirilmesinde fizik muayene ve diğer tanısal testlere yardımcı bir yöntemdir.^[6] Üç boyutlu bilgisayarlı yürüme analizi, normal yürümeden sapmaların objektif olarak değerlendirilmesinde, primer patolojilerin ve kompensatuvar mekanizmaların ayırımında ve uygun tedavinin belirlenmesinde önemli bir yer tutar.^[7] Bilgisayarlı yürüme analizi ile elde edilen kinematik, kinetik, dinamik elektromiyografi (EMG) verileri ve zaman-mesafe parametreleri ile fizik muayene ve görsel video analizi birlikte değerlendirildiği zaman, primer patolojiler ve kompensatuvar mekanizmaların



Şekil 1. Yürüme döngüsü.

ayrımı yapılabilmekte, tedavi algoritmaları belirlenebilmektedir.^[8]

Yürüme döngüsü boyunca değişen eklem açılarını kaydetmek için belirli anatomik noktalara yansıtıcı işaretleyiciler (marker) yerleştirilir. Hastalar, 9–10 metrelik yürüme yolunda, günlük hayattaki yürüme paterni ve hızıyla, çıplak ayakla veya yardımcı yürüme cihazları ile yürütülerek kayıtlar alınır. Ayağın yere uyguladığı toplam kuvveti ve yer tepkimesi kuvveti vektörünü (YTKV) ölçmek amacıyla kullanılan basınca duyarlı kuvvet platformlarına basılarak geçildiğinde, ayağın yerde oluşturduğu YTKV bilgisayar tarafından kaydedilir. İşaretleyicilerden gelen sinyaller de kızıl ötesi kameralar ile izlenir ve bilgisayara aktarılır. Böylece her eklem için sagittal, frontal ve transvers düzlemlerdeki açıları ölçülür (Şekil 2). Ayrıca adım uzunluğu, çift adım uzunluğu, adım genişliği, kadans ve yürüme hızı gibi zaman ve mesafe parametreleri hesaplanarak hastanın tedavi sonuçları da değerlendirilebilir.

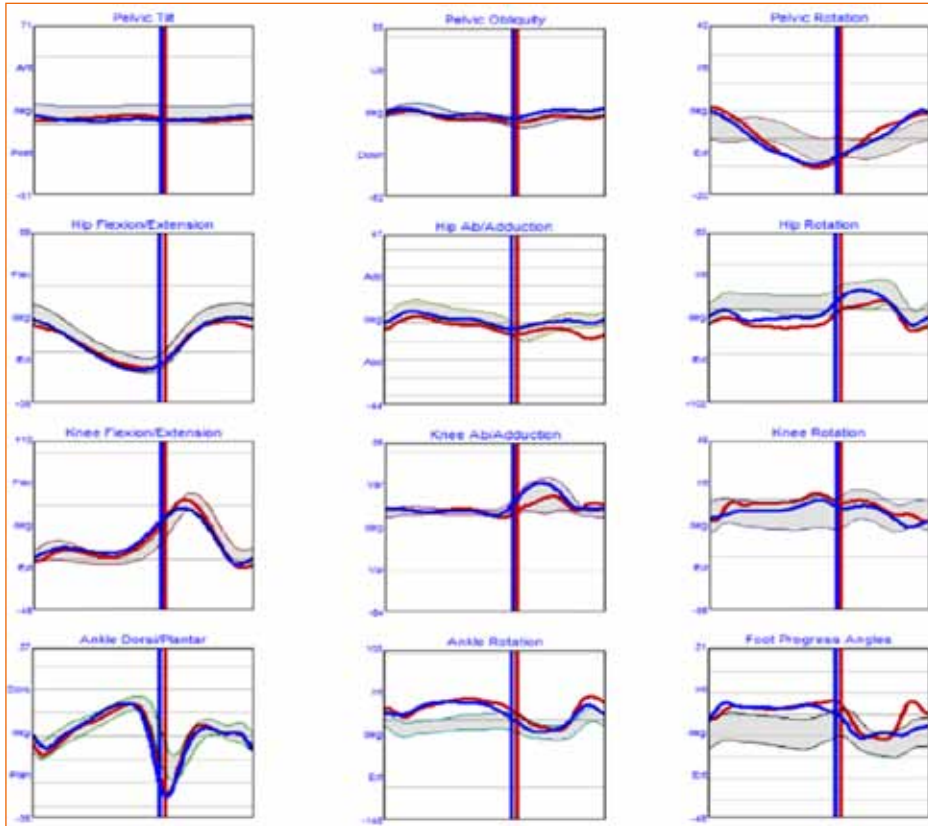
KİNEMATİK ANALİZ

Kinematik; hareketi oluşturan güçler dikkate alınmadan sadece hareketin oluşumu ile ilgilenen analiz

boyutudur. Kinematik analizde gövde, pelvis, kalça, diz ve ayak bileğinin yürümenin her fazında sagittal, koronal ve transvers düzlemlerdeki pozisyonu ve eklem hareket açıları sayısal veri olarak kaydedilir.^[2,3,5,6] Kinematik grafikler hareket paterninin objektif olarak değerlendirilmesine, primer deformiteler ile kompanساتuvar mekanizmaların ayırt edilmesine olanak sağlar. Şekil 2’de sagittal, koronal ve transvers plandaki kinematik grafikler gösterilmektedir.

Sagittal plan

Hemipelvis, yürümenin tüm fazları boyunca ortalama 10° anterior tilttedir. Kalça ilk temas sırasında yaklaşık 30° fleksiyondadır ve basma sonu fazında maksimum ekstansiyona gider. Kalça salınım öncesi fazdan başlayarak fleksiyona gider ve salınım sonu fazının başlangıcına kadar fleksiyon devam eder. Salınım sonu fazında ilk temasa hazırlık için kalça minimal ekstansiyona gider. Diz ilk teması tam ekstansiyon veya 5° ’lik hafif fleksiyon ile yapar. Yüklenmenin kabulü fazında şok absorpsiyonu için 15° ’lik fleksiyona gider, basma ortası fazda tam ekstansiyon yaptıktan sonra basma sonu fazından başlayarak fleksiyona gider. Salınım



Şekil 2. Sagittal, frontal ve transvers düzlemlerdeki eklem kinematik grafikleri.

fazının ilk 1/3'lük kısmında maksimum diz fleksiyonu oluşur. Salınım ortası fazdan başlayarak ilk temasa kadar diz progresif olarak ekstansiyona gider. Ayak bileği nötral pozisyonda ilk teması yapar ve hızla plantarfleksiyona gider. Yüklenmenin kabulü fazından başlayarak basma fazının büyük bölümünde dorsifleksiyon yapar. Salınım öncesi fazda tepe plantarfleksiyonu yapan ayak ilk salınımında dorsifleksiyona, salınım fazı sonunda ise ilk temasa hazırlık için hafif plantarfleksiyona gider.^[1-4]

Koronal plan

Basan taraftaki hemipelvis, yüklenmenin kabulü fazında yükselir, ilk salınımında maksimum alt seviyesine gelir, salınım ortası ve salınım sonu fazlarında ise ilk temasa hazırlık için tekrar yükselir. Kalça, yüklenmenin kabulünde adduksiyona gider, sonra erken salınıma kadar progresif abduksiyona gider. Erken salınımdan ilk temasa kadar tekrar adduksiyona gelir. Diz ilk temastan salınım öncesi faza kadar nötraldedir. Erken salınımdan salınım ortası fazın yarısına kadar varusa gider ve salınım fazı sonunda tekrar nötrale gelir. Ayak bileği, salınım sonu fazı ve ilk temas anında internal rotasyonda iken, yüklenmenin kabulünde eksternal rotasyona gelir, basma fazının kalan bölümünde nötralde kalan ayak bileği salınım fazı boyunca eksternal rotasyonda kalır.^[1-4]

Transvers plan

Hemipelvis, transvers planda basma ortası ve salınım ortası fazlarında olmak üzere iki defa nötral pozisyona gelir. Basma fazında; ilk temastan basma ortası faza kadar internal rotasyon yapar ve salınım öncesi fazda maksimum eksternal rotasyona gider, salınım ortası fazdan ilk temasa kadar tekrar internal rotasyon yapar. Kalça ilk temas esnasında nötral pozisyonundadır. Yüklenmenin kabulü fazında internal rotasyon, salınım öncesi ile ilk salınım fazlarında ise eksternal rotasyon yapar. Salınım fazının geri kalan kısmında ise tekrar internal rotasyona gider. Ayak, ilk temas ve basma ortası fazları arasında eksternal rotasyonda dururken basma sonu fazında internal rotasyon, salınım fazında iken ayağın yerden temasının kesilmesine yardımcı olmak için eksternal rotasyon yapar.^[1-5]

KİNETİK ANALİZ

Yürüme analizinde; kinetik grafiklerdeki normal ve anormal moment oluşumu ile kasların fonksiyonel durumu ve güç üretimine olan katkısı ölçülebilir. YTKV'nin vertikal, transvers ve sagittal bileşenleri kuvvet platformları aracılığıyla ölçülür. Bu ölçüme dayanarak, bilgisayar ortamında biyomekanik modellerle ile kalça, diz ve ayak bileği eklemlerindeki momentler

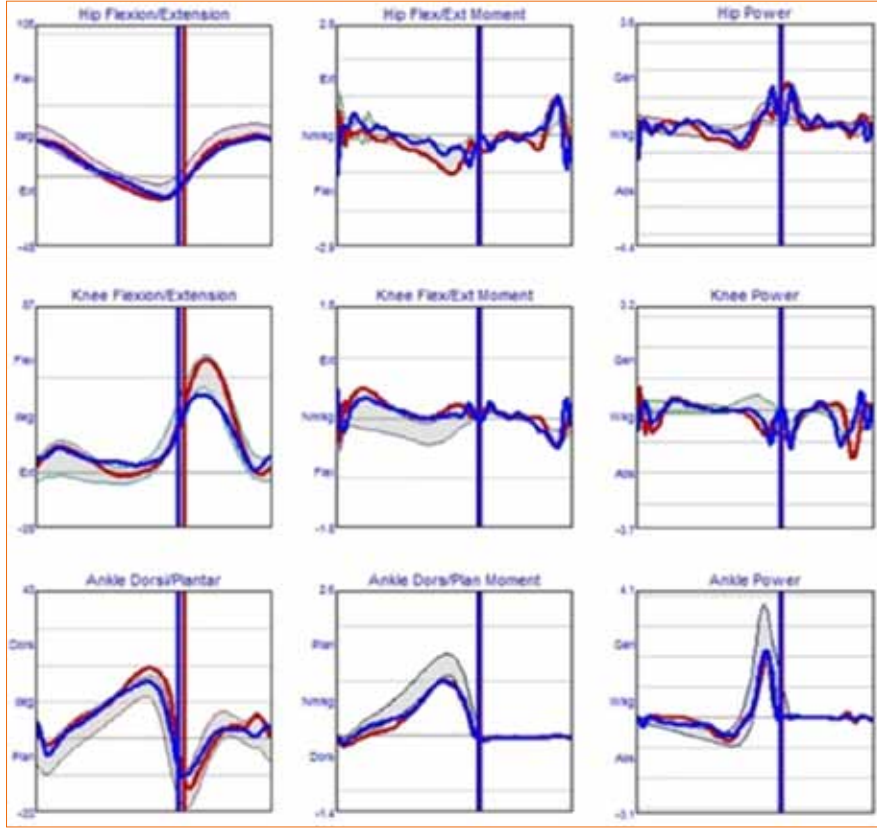
ve güçler hesaplanır. Eklem momentleri; YKTV'ye karşı eklem çevresindeki agonist ve antagonist kasların oluşturduğu net momenttir ve hangi kas grubunun dominant olduğunu gösterir. Moment grafiklerinde pozitif değerler ekstansör momenti, negatif değerler ise fleksör momenti gösterir.

Güç ise moment ve eklem açılma hızının çarpımına eşittir. Kaslar konsantrik kasıldıkları zaman boyları kısalır ve güç üretirken, eksentrik kasıldıklarında ise boyları uzar ve güç emilimi olur. İzometrik kasılmada ise kasın boyu değişmez ve güç üretimi veya emilimi olmaz. Güç grafiğinde pozitif değerler güç üretimini gösterirken, negatif değerler ise güç emilimini gösterir.^[1-4] Şekil 3'te kalça, diz ve ayak bileğinin sagittal düzlemdeki kinematik, moment ve güç grafikleri gösterilmektedir.

Sagittal plan

Kalça ilk temas sırasında 30°'lik fleksiyonundadır ve basma ortası faza kadar progresif olarak ekstansiyona gider. Bu dönemde kalça ekstansörleri konsantrik kasıldığı için ekstansör moment ve güç üretimi meydana gelir (Şekil 3). Basma ortası fazda vücut ağırlık merkezi destek alanının ortasından geçtiği için kalça eklem momenti fleksöre döner. Ancak bu fazda kalça ekstansiyonu devam eder. Basma ortası fazda enerji emilimi kalça bağları tarafından yapılmaktadır. Basma sonu fazında kalça fleksörleri kalça ekstansiyonunu sınırlamak için önce eksentrik olarak kasılır ve güç emilimi olur. Salınım öncesi fazda ise kalça fleksörlerinin konsantrik kasılmasıyla kalça fleksiyonu oluşur ve güç üretimi olur. Salınım ortası fazda kalça pik fleksiyona ulaşır. Salınım sonu fazında kalçayı ilk temasa hazırlamak için kalça ekstansörleri konsantrik kasılır ve ekstansör moment oluşur.

Dizin salınım sonu fazında hızla ekstansiyona gidişini frenlemek ve dizi ilk temasa hazırlamak için diz fleksörleri eksentrik kasılır ve fleksör moment oluşur. Bu fleksör moment basma fazının erken dönemine kadar devam eder, yüklenmenin kabulü fazında ise ekstansör moment oluşur. Ekstansör momentin ilk yarısı, yüklenmenin etkisiyle ekstremitenin kollapsını önlemek için diz ekstansörlerinin eksentrik kasılmasıyla oluşur ve güç emilimi olur (Şekil 3). Daha sonra diz ekstansörleri konsantrik kasılarak güç üretir ve diz ekstansiyona gider. Basma ortası fazda YTKV diz ekleminin önünden geçer ve fleksör moment oluşur. Salınım öncesi fazdan başlayarak ilk salınım fazı boyunca rektus femoris eksentrik kasılarak dizin hızla fleksiyona gidişini kontrol eder ve güç emilimi olur. Bu dönemde rektus femoris kalçada konsantrik kasıldığı için kalça fleksiyonuna yardım eder ve kalça fleksör momentini oluşturur, güç üretimi olur.



Şekil 3. Kalça, diz ve ayak bileği eklemlerinin kinetik grafikleri.

İlk temas sırasında ayağın yere kontrollü inişini sağlamak için ayak bileği dorsifleksörlerinin eksentrik kasılmasıyla güç emilimi olur ve dorsifleksör moment meydana gelir. Bu dönem aynı zamanda birinci yuvarlanma olarak da adlandırılır. Ayak yere tam bastıktan sonra YTKV ayak bileğinin önünden geçer ve plantarfleksör moment oluşur. Bu dönemde tibianın öne doğru gidişini ve ayak dorsifleksiyonunu frenlemek için ayak plantarfleksörleri eksentrik kasılır ve güç emilimi olur. Bu dönem ikinci yuvarlanma olarak tanımlanır. Basma sonu fazında gastrosoleus kası konsantrik kasılarak ayağa plantarfleksiyon yaptırır, topuğun yerden kalkmasını sağlar ve üçüncü yuvarlanma meydana gelir. Bu anda bir güç patlaması yani güç üretimi olur. Salınım fazında ayağın kütlesi vücudun diğer bölümlerine göre daha küçük olduğundan, ayak bileğinde moment ve güç üretimi veya emilimi olmaz.^[1-4]

Koronal plan

Basma fazında basan taraftaki kalça abduktörleri kasılarak karşı hemipelvisin düşmesini engeller ve basma fazı boyunca net abduktör moment oluşturur. Basma fazında YTKV'nin diz ekleminin mediyalinden

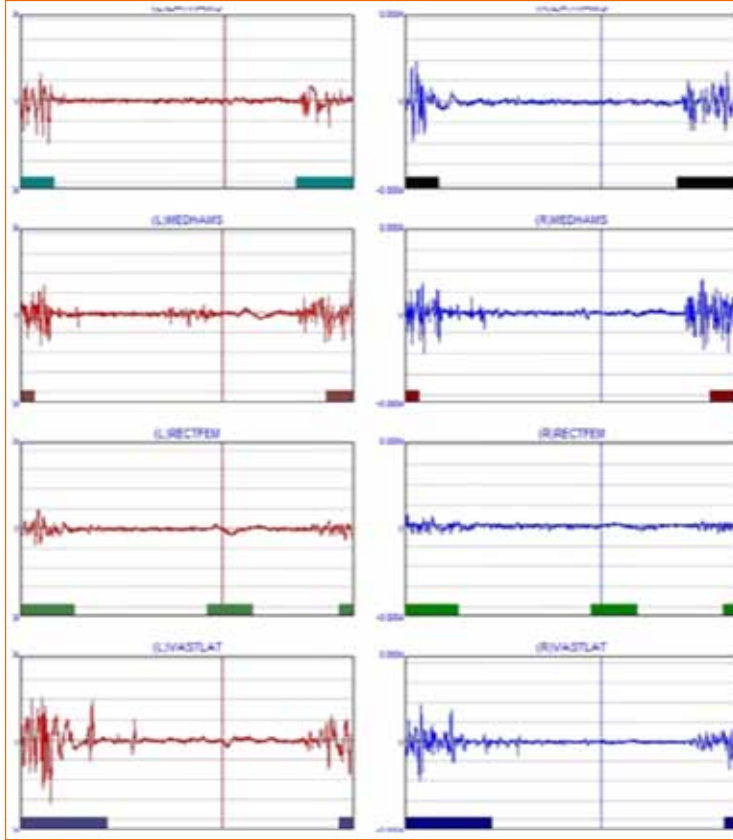
geçmesi nedeniyle basma fazı boyunca abduktör moment oluşur.^[1,4]

DİNAMİK ELEKTROMİYOGRAFI

Yürüme analizinde hareket halinde iken kas kontraksiyonu dinamik EMG ile ölçülür. Dinamik EMG ile yürüme döngüsünde kasılmanın zamanı, kasılma süresi ve şiddeti hakkında bilgi edinilir.^[7] Dinamik EMG'de yüzeysel veya iğne elektrotlar kullanılır. Yüzeysel elektrotlar ile genel olarak kas aktivitesi hakkında bilgi edinilir. İğne EMG ise spesifik kasa ait aktiviteyi değerlendirmek için kullanılır, ancak çocuklar için ağırlı bir işlemdir ve yürüme esnasında iğne yerinden oynayabilir.^[8] Bu nedenle iğne EMG'nin klinik pratikteki kullanımı yaygın değildir. Şekil 4'te bilateral mediyal ve lateral hamstring, rektus femoris ve vastus lateralis kaslarına ait normal dinamik EMG grafikleri gösterilmektedir.

YÜRÜME ANALİZİNİN KISITLILIKLARI

Yürüme analizi, laboratuvarları donanımlı ekip gerektirmesi ve yüksek maliyeti nedeniyle yaygın



Şekil 4. Dinamik EMG grafikleri.

değildir. Hastanın değerlendirilmesi ve kayıtların alınması 2-2,5 saat, verilerin değerlendirilmesi ve raporlanması ise 1-2 saat sürer. Ayrıca, tetkik laboratuvar ortamında yapıldığı için hasta günlük yürüme paterninden ve hızından farklı şekilde yürüebilir ve bu sonuçların objektif olarak değerlendirilmesini olumsuz etkileyebilir.^[10] Ölçümlerin güvenilirliği için sistemin günlük olarak kalibrasyonu yapılmalıdır. Yürüme analizi laboratuvarı ekibi düzenli olarak eğitim almalı, verilerin toplanması, analizi ve yorumlanması aşamasında deneyimli olmalıdır.^[9,10]

SONUÇ

Üç boyutlu bilgisayarlı yürüme analizinin kullanım alanını serebral palsi gibi yürüme bozukluklarıyla seyreden nöromusküler hastalıklar oluşturmaktadır. Serebral palsili çocuklarda yürüme bozuklukları; kaslarda oluşan spastisiteye ve daha sonra oluşan kemik deformitelerine, primer patolojiye sekonder gelişen kompensatuvar mekanizmalara bağlı olabilir. Bilgisayarlı yürüme analizi verileri ile yürüme bozukluklarına neden olan bu farklı mekanizmalar ayırt edilebilir

ve hasta için en uygun tedavi belirlenebilir.^[11-13] Ancak, sadece yürüme analizi ile tanı koyulamayacağı akılda tutulmalıdır. Ayrıntılı fizik muayene ve gerekli tanı testleri yapılmalı ve yürüme analizi tüm bu verilerin eşliğinde yorumlanmalıdır.^[14-16]

Sonuç olarak; bilgisayarlı yürüme analizi özellikle nöromusküler hastalıklarda primer patolojilerin ve kompensatuvar mekanizmaların belirlenmesinde, tedavinin planlanmasında ve tedavi etkinliğinin takibinde oldukça yararlıdır.^[17,18]

KAYNAKLAR

1. Miller F. Cerebral Palsy: Cerebral Palsy Management. Berlin Heidelberg New York: Springer; 2005.
2. Perry J, Burnfield JM. Gait analysis: Normal and pathological function, 2nd ed. Thorofare, New Jersey: SLACK Incorporated; 2010.
3. Gage JR, Schwartz MH, Koop SE, Novacheck TF, editors. The Identification and Treatment of Gait Problems in Cerebral Palsy. London: Mac Keith Press; 2009.
4. Ounpuu S, Gage JR, Davis RB. Three-dimensional lower extremity joint kinetics in normal pediatric gait. J Pediatr Orthop 1991;11(3):341-9.

5. Yavuzer G. Üç boyutlu niceliksel yürüme analizi. *Acta Orthop Traumatol Turc* 2009;43(2):94-101.
6. Balaban B. Yürüme analizi: Temel kavramlar ve uygulama. Beyazova M, Kutsal YG, editörler. *Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon*, 2. baskı. Güneş Tıp Kitabevi; 2011. p.365-78.
7. Whittle M. Clinical gait analysis: a review. *Human Movement Science* 1996;15:369-87.
8. Davis RB. Clinical gait analysis. *IEEE Eng Med Biol Mag* 1988;7(3):35-40.
9. Simon SR. Quantification of human motion: gait analysis-benefits and limitations to its application to clinical problems. *J Biomech* 2004;37(12):1869-80.
10. Kanatlı U, Yetkin H, Songür M, Öztürk A, Bölükbaşı S. Yürüme analizinin ortopedik uygulamaları *TOTBİD* 2006;5:1-2, 53-9.
11. Gage JR. Gait analysis. An essential tool in the treatment of cerebral palsy. *Clin Orthop Relat Res* 1993;(288):126-34.
12. DeLuca PA, Davis RB 3rd, Ounpuu S, Rose S, Sirkin R. Alterations in surgical decision making in patients with cerebral palsy based on three-dimensional gait analysis. *J Pediatr Orthop* 1997;17(5):608-14.
13. Molenaers G, Van Cappenhou A, Fagard K, De Cat J, Desloovere K. The use of botulinum toxin A in children with cerebral palsy, with a focus on the lower limbs. *J Child Orthop* 2010;4(3):183-95. [CrossRef](#)
14. Kay RM, Dennis S, Rethlefsen S, Reynolds RA, Skaggs DL, Tolo VT. The effect of preoperative gait analysis on orthopaedic decision making. *Clin Orthop Relat Res* 2000;(372):217-22.
15. Pasparakis D, Darras N. Normal walking principles, basic concepts, terminology 3-dimensional clinical gait analysis. *EEXOT* 2009;60(4):183-94.
16. Yavuzer G. Nöromuskuloskeletal sistem hastalıklarının değerlendirilmesinde bilgisayarlı yürüme analizinin yeri. *J PMR Sci* 2007;2:43-5.
17. Cimolin V, Piccinini L, Turconi AC, Crivellini M, Galli M. Are knee kinematic anomalies in swing in swing due to rectus femoris spasticity different from those due to femoral anteversion in children with cerebral palsy? A quantitative evaluation using 3D gait analysis. *J Pediatr Orthop B* 2010;19(3):221-5. [CrossRef](#)
18. Desloovere K, Molenaers G, Feys H, Huenaeerts C, Callewaert B, Van de Walle P. Do dynamic and static clinical measurements correlate with gait analysis parameters in children with cerebral palsy? *Gait Posture* 2006;24(3):302-13.