



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Yürüme Döngüsünün Alt Eksterimite Kemikleri Üzerindeki Kinematik Çözümlemesi

Arif ÖZKAN ^{a,*}, Şener SÖĞÜT ^b

^a*Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Biyomedikal Müh.i Bölümü Umuttepe Kampüsü 41620 KOCAELİ*

^b*Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD Konuralp Kampüsü 81320 DÜZCE*

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: arif.ozkan@duzce.edu.tr

ÖZET

Diz eklemi oluşturulan tüm yapılar normal hareket edilmesinin sağlanmasında önemli rol oynarlar. Ortopedik olarak normal bir insanın yürüme döngüsü femur ve tibia kemiklerinin bir dizi konum değişim entegrasyonu ile ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, normal bir alt ekstremitte dizilimine sahip bir insanın yürümesindeki dinamik kuvvet analizi yapılmış ve diz eklemi kinematik çözümlemesi ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Alt ekstremitte, Yürüme döngüsü, Kinematik, Femur, Tibia*

Kinematically Analyses Of Walking Cycle On Lower Exterimity Bones

ABSTRACT

Both knee joint bones and other structures of knee joint have more important role in walking cycle. Walking cycle of clinically normal human done with integration of locational changes of tibia and femur bones. In this study, the biological structures consisting of human knee joint are kinematical analyzed. In addition, the kinematic analyses of knee joint bones in human walking cycle are done.

Keywords: *Lower extremity, Walk cycle, Kinematic, Femur, Tibia*

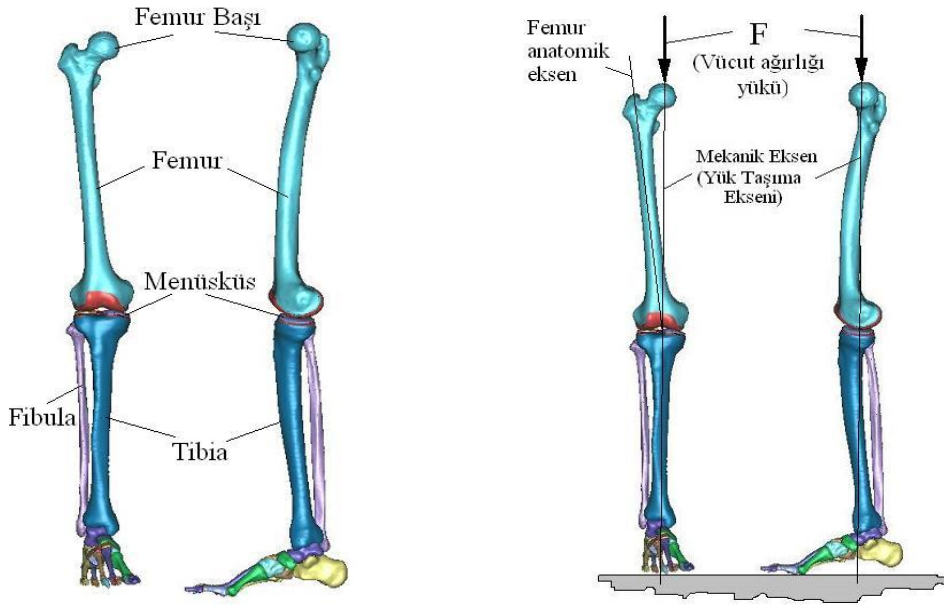
I. GİRİŞ

Diz eklemi insan vücut yapısı içinde yer alan en büyük sinovyal aralık olarak tanımlanır. Aynı zamanda sinovya bir membran olarak tüm diz tarafını sarması nedeniyle çapraz bağlar eklem içi olmasına rağmen sinovya dışında olmaktadır [1-6]. Diz eklemi yatay eksen etrafında fleksiyon ve ekstansiyon yaparken ön düzlemde içe doğru kayma adı verilen addüksiyon hareketi ile dışa doğru kayma olarak tanımlanan addüksiyon hareketini yapar. Tıbbi terminoloji olarak medial-lateral olarak tanımlanmış olan iç ve dış düzlemde ise sınırlı dönme yapar [6-12]. Kabul edilen bir terminoloji ile anlık dönme merkezi, diz eklemine aktarılan yükün dik olarak etkime yapmasını ve bağlar üzerine aşırı kuvvet aktarılmasını engelleme görevi görür. Diz aktif olarak 140°, pasif olarak 160° fleksiyon yapabilir [5-10].

İnsan hareket durumu olarak ortaya çıkan yürüme, merdiven çıkma, koşma, spor yapma gibi çeşitli duruş pozisyonları ve aktiviteleri sırasında diz eklemine etkiyen kuvvetler farklılık arz etmektedir. Normal duruş pozisyonu ve herhangi bir ortopedik rahatsızlığı/bozukluğu olmayan bir bireyin her iki ayak üzerinde durması esnasında, her iki diz eklemi vücut ağırlığının yaklaşık olarak yarısını taşır. Kalan vücut yükü, tibia ve ayak bileği üzerinden ayak kemiklerine buradan da yer düzlemine aktarılır [6-12]. Diz eklemi yapısının, tüm bu yüklere dayanım sağlayabilmesi adına alt ekstremitenin ortopedik olarak normal dizilim kabul edilen şartlara haiz olması gerekmektedir. Buna göre referans mekanik eksen, ayakta duran bir kişide uyluk (femur) başı merkezinden ve diz eklemine merkezinden ve talus kemiğinin üst tepesinin merkezinden geçen durumda olmalıdır. Cerrahi düzeltme ve operasyonlar bu doğrulttu dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu çalışmada da bu dizilim esas alınarak kinematik çözümleme ile yürüme döngüsü ele alınmıştır.

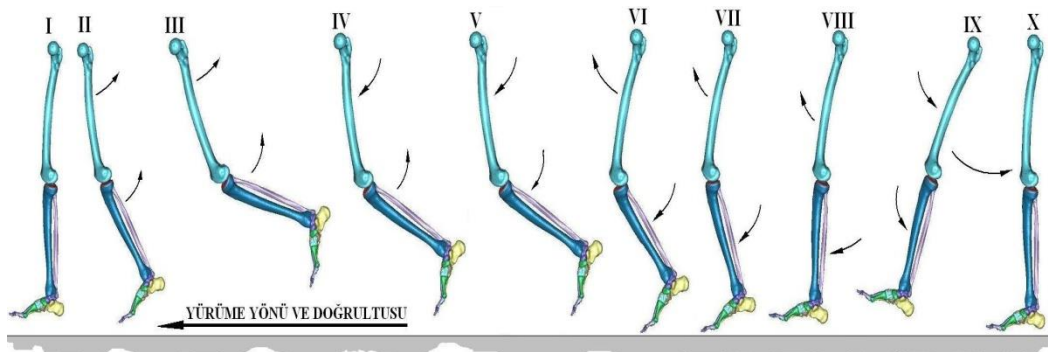
A. NORMAL BİR İNSANIN YÜRÜME KONUMU DİNAMİK KUVVET ANALİZİ

Uyluk kemiği (Femur), bacak kemiği (Tibia), ince kaval kemiği (Fibula) ve tüm ayak kemikleri Şekil 1.1'de verildiği gibi birbirleri ile bir eklem oluşturma halinde hem ön görünüş hem de yan görünüş olarak verilmiştir. Diz eklemi, insan vücut ağırlığını taşıyan ve aktaran bir sistem olup, biyomekanik açıdan çok önem arz eden bir yapı olarak ortaya çıkmaktadır. Alt iskelet sistemi yapısında en önemli yapısal oluşum diz eklemi mekanizması olup, femur ile tibia arasındaki mekanik aktarımı ve hareket düzenini sağlamaktadır. Alt iskelet yapısının normal duruş konumuna göre, insan vücut ağırlığı dolayısı ile gelen yüklerin mekanik eksen doğrultusunda uygulanması ile konumları Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Alt iskelet yapısı elemanları ve yük taşıma konumu

İnsan iskeletinin yapısının tam bir yapısının yarısının yürüme döngüsüne haiz pozisyonları (postur'ları) Şekil 1.2'de verilmiştir. Yürüme döngüsü 10 aşamalı konumda tanımlanmış olup, femur ve tibia'nın birbirlerine göre hareket konumları belirtilmiştir (Şekil 1.2). Yürüme pozisyon tanımlaması için yalnızca diz eklemi esas alınmış olup, bu eklemden bir mekanik mafsallık bağlantısı oluşumuna göre değerlendirme yapılmıştır. İlâveten, ayak bileği eklemi sabit kabul edilmiş ve ayak kemikleri bir bütün olarak göz önüne alınmıştır. I. aşama normal duruş pozisyonu olup yürümeye başlangıcı olarak kabul edilmiştir. II. ve III. döngüde gerek femur gerekse de tibia yürüme yönünün tersine hareket etmektedir. IV. yürüme pozisyonuna bakıldığında, femur yürüme yönüne doğru hareket ederken, tibia ve diğer kemik yapılar yürüme yönünün tersine hareket ederek geriye doğru konum almaktadırlar. V., IV., VII. ve VIII. aşamalarda tüm diz eklemi kemik yapıları yürüme yönüne doğru hareket göstermektedir. VIII. Yürüme döngüsünde uyluk kemiğinin çok yavaş hızına karşılık tibia ve diğer bağlantı elemanlarının açısal hızları daha yüksek olarak görülmektedir. IX. döngüde tüm diz eklemi elemanları yürüme yönünün tersi doğrultusunda hareket etmektedir.



Şekil 1.2. Bir tam tur yürüme döngüsü ve aşamaları

II. DİZ EKLEMİ KEMİKLERİNİN MEKANİK HAREKET DURUMU

Şekil 1.2'den yola çıkarak mekanik bir çözüm ifadesi üretebilmek adına, alt ekstremité elemanlarını etkileyen kuvvet ve dinamik büyüklükler (tork (T), açısal ivme (α) ve açısal hız (ω)) Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu serbest cisim diyagramında insan vücut ağırlığı dolayısıyla uygulanan yük ele alınmış olup elemanlar arasında sürtünme kuvvetinin oluşmadığı varsayılmıştır.

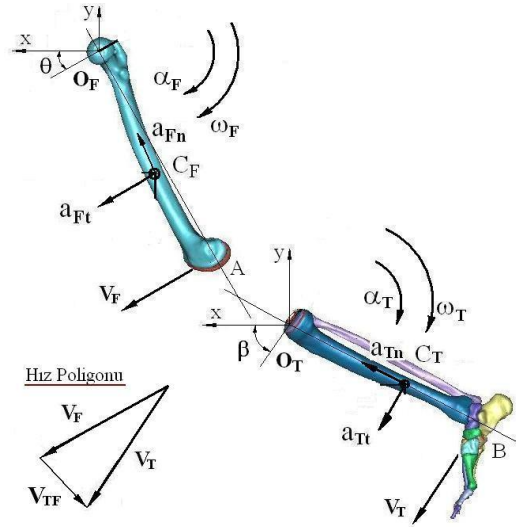
Yürüme konumunda femur ile tibia birbirlerine göre bağımsız ve farklı yükler ile yüklenebildiği gibi sadece bir moment ile de tahrik edilebilir. Bu nedenle yürüme esnasında femur ile tibia birbirlerine göre iki farklı fazda, bağımlı ve bağımsız davranış göstermektedirler. Femur normal duruş yürüme pozisyonu alırken Şekil 2.1'de görüldüğü gibi O_F dönme merkezine göre T_F torku ile tahrik edilir ve T_{TF} kas itici kuvveti altında α_F açısal ivmesi ve ω_F açısal hızı ile hareket eder. Öte yandan tibia ve diğer bağılı elemanlar femurdan bağımsız tahrik edilmesi konumunda O_T dönme merkezine göre, T_T torku ile kuvvet etkisi altına alınır ve F_{T3} kas itici kuvveti tesiri ile α_T açısal ivmesi ve ω_T açısal hızı ile hareket eder. Böylelikle femura göre salınım hareketi ortaya çıkmaktadır [1].

Tibia ve diğer bağılı bulunan elemanlar femur ile birlikte femura bağımlı hareket ettiği varsayılırsa, tibiayı tahrik eden T_T torku yok demektir. Bu durumda, femuru tahrik eden T_F torkun etkisi ile O_F dönme merkezine göre dönen femur ile birlikte tibia da α_T açısal ivmesi ve ω_T açısal hızı etkisi ile O_T dönme merkezine göre dönerek salınım yapar. Şekil 2.1'te verilen alt ekstremitenin kinematik yapısı iki elemanlı bir mekanizmanın yapısına benzemektedir. Buna göre, Şekil 2.1'te verilen diz eklemi kemiklerini oluşturan yapıda, femur ve tibia elemanlarının sırası ile O_F ve O_T dönme merkezlerine göre w_F ve w_T açısal hızları formül 2.1'de verildiği haliyle ifade edilebilir [1].

$$w_F = \frac{d\theta}{dt} \quad w_T = \frac{d\beta}{dt} \quad (2.1)$$

Şekil 2.1'de A ve B noktalarının femur doğrusal hızı V_F , ve tibial doğrusal hızı V_T , sırası ile O_F ve O_T dönme merkezlerine aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$V_{OF-A} = \frac{dR_{OF-A}}{dt} ; \quad V_{OT-B} = \frac{dR_{OT-T}}{dt} \quad (2.2)$$



Şekil 2.1. Alt iskelet sistemi mekanizma ve kinematik yapısı ve serbest cisim diyagramı [1]

Doğrusal hız ile açısal hız arasındaki bağıntı formül 2.3'de verilmiştir.

$$|V_F| = R_{OF-A} \cdot \omega_F \quad (2.3)$$

$$V_T = V_F \pm V_{TF}$$

Tibial açısal hız ise;

$$\omega_T = \frac{V_{TF}}{R_{OT-B}} \quad (2.4)$$

Femur ağırlık merkezinin, C_F , ve tibia ağırlık merkezinin, C_T , doğrusal ivmeler ile açısal hız ve açısal ivmeleri arasındaki ilişki aşağıdaki genel denklemler ile ifade edilebilir;

$$a_{Fn} = R_{OT-CF} \cdot \omega_T^2 \quad (2.5)$$

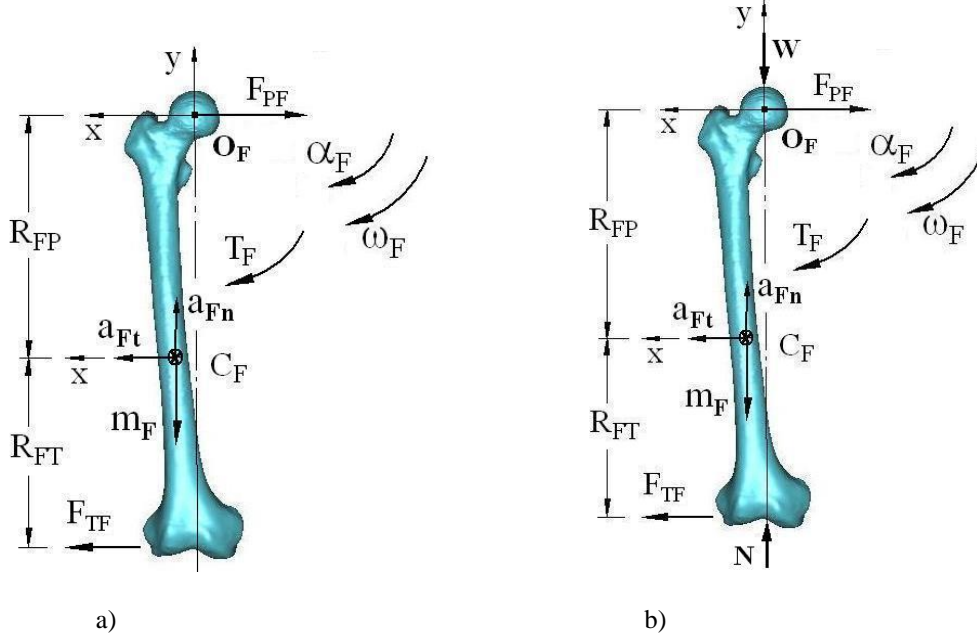
$$a_{Ft} = R_{OF-CF} \cdot \alpha_F$$

B. UYLUK KEMİĞİ (FEMUR) DİNAMİK KUVVET ANALİZİ

Alt ekstremité sistemi elemanlarından uyluk kemiği (femur) üzerinde bulunan kuvvetlerin analizini yapabilmek için Şekil 2.2 a'da görüldüğü gibi femurun serbest cisim diyagramı elde edilmiştir. Ayrıca, statik denge şartlarında tesir kuvvetleri yerleştirilerek sistem oluşturulmuştur. Femur, yürüme esnasında femur başı küresi merkezi (O_F) dönme merkezi olarak kabul edilerek x-ekseni yönünde α_F açısal ivme ve ω_F açısal hız ile T_F torku etkisiyle hareket edebildiği varsayımı esas alınmıştır. Femurun ağırlık merkezi C_F ile adlandırılmış ve kütlesi m_F olarak tanımlanmıştır. Öte yandan, tüm bacağın yere basmadığı ve dolayısı ile vücut ağırlığı yükü taşımadığı, aynı zamanda yerden herhangi bir reaksiyon kuvveti almadığı ön koşul olarak belirlenmiş ve bacağın yerden yukarda ve serbest halde yürüme konumundaki durumu incelemeye alınmıştır. Şekil 2.2a'da gösterilen R_{FP} ve R_{FT} parametreleri yer vektörleri olup, bağlantı elemanlarına göre adlandırılmıştır (sürtünme kuvveti dikkate alınmamıştır).

Uyluk kemiğine bağlı ve yürüme görevi için, uyluk kemiği x-ekseni yönünde F_{T2} kuvveti, a_{Ft} teğetsel ivmesi ve T_F döndürme torku ile tahrik edilerek hareket ettiği varsayılırsa, Newton'un ikinci kanunu gereği kuvvet denge denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned}\sum F &= F_{PF} + F_{TF} = m_F \cdot a_{CF} \\ \sum T &= T_F + (R_{FP} \times F_{PF}) + (R_{FT} \times F_{TF}) = I_{CF} \cdot \alpha_F\end{aligned}\quad (2.6)$$



Şekil 2.2. Uyluk kemiği serbest cisim diyagramı (kuvvet analizi) [1]

O_F dönme merkezli femur x eksenine göre herhangi bir açı altında rastgele bir pozisyonda olduğu varsayılırsa yukarıdaki denklemlerin x ve y eksenlerine göre bileşenleri dikkate alınır, femura etkleyen kuvvet ve momentlerin toplamı aşağıdaki şekilde izah edilebilir.

$$\begin{aligned}F_{PF_x} + F_{TF_x} &= m_F \cdot a_{CF_x} \\ F_{PF_y} + F_{TF_y} &= m_F \cdot a_{CF_y} \\ T_F + (R_{FP_x} F_{PF_y} - R_{FP_y} F_{PF_x}) + (R_{FT_x} F_{TF_y} - R_{FT_y} F_{TF_x}) &= I_{CF} \cdot \alpha_F\end{aligned}\quad (2.7)$$

Yapısı gereği kemik yapıya kas kuvvetleri neticesinde etkilenen ve aktarılan tibia-femoral kuvvet, F_{TF} , denklemlerdeki değerler $[A] \times [B] = [C]$ matris formatında yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -R_{FP_y} & R_{FP_x} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{PF_x} \\ F_{PF_y} \\ T_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_F \cdot a_{CF_x} - F_{TF_x} \\ m_F \cdot a_{CF_y} - F_{TF_y} \\ I_{CF} \cdot \alpha_F - [R_{FT_x} F_{TF_y} - R_{FT_y} F_{TF_x}] \end{bmatrix}\quad (2.8)$$

Yukarıdaki $[A] \times [B] = [C]$ formatındaki bilinmeyen değişkenlerin katsayıları A matrisinde, bilinmeyen değişkenler ise B vektöründe ve bilinen sabit değerlerde C vektöründe çözüme ulaşılabilir. Bu çözüm unsurunda; A matrisi sistemin geometrik bilgilerini, C matrisi dinamik bilgileri içerir. B matrisi ise femura kaslar tarafından uygulan ve en önemlisi de bilinmeyen döndürme torkunu, femur başı dönme merkezine kalça kemiği tarafından uygulanan reaksiyon kuvvetlerini içerir.

Şekil 2.2b'de görüldüğü gibi, insan vücut ağırlığından dolayı femura WF gibi bir ekstra yük bindiği varsayılırsa WF insan vücut ağırlığı tesisirne karşılık, NF gibi bir tepki kuvveti ortaya çıkacaktır. Böylelikle, vücut ağırlığı etkisiyle femura uygulanan WF yükünün değeri elde edilebilir duruma geçecektir. Burada, sürtünme kuvveti dikkate alınmadan, yukarıdaki femur ile ilgili kuvvet ve moment denklemleri (denklem 2.9) aşağıdaki gibi yazılabilir. Bu geliştirilen denklemler, yukarıdaki çözümlerde olduğu gibi benzer şekilde $[A] \times [B] = [C]$ matris formatında yazılarak bilinmeyenler için çözüme gidilir.

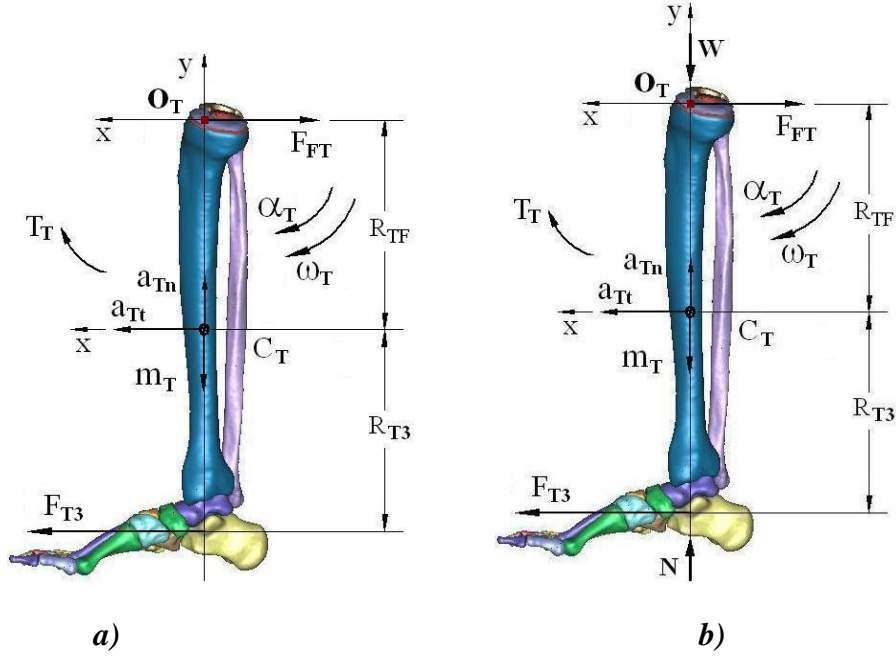
$$\begin{aligned} F_{PF} + F_{TF} + W_F + N_F &= m_F \cdot a_{CF} \\ T_F + (R_{FP} \times F_{PF}) + (R_{FT} \times F_{TF}) + (R_{FW} \times W_F) + (R_{FN} \times N_F) &= I_{CF} \cdot \alpha_F \end{aligned} \quad (2.9)$$

C. DİZ ALTI KEMİKLERİNİN DİNAMİK KUVVET ANALİZİ

Diz altı iskelet sistemi ana unsurlarından tibia (fibula ve ayak kemikleri dahil) üzerinde bulunan kuvvetlerin analizini yapabilmek için Şekil 2.3 a'da görüldüğü gibi tibianın serbest cisim diyagramı çizilmiş olup statik denge şartlarında kuvvetler sistemi yerleştirilir. Sürtünmenin dikkate alınmadığı varsayılmıştır. Yürüme esnasında bazen femur sabit varsayımı ile tibia, tibia platosu üzerinde bulunan ve şekilde görülen O_T merkezine göre dönme hareketi yapar [1].

Şekil 2.3 a'da gösterilen R_{TF} ve R_{T3} parametreleri yer vektörleri olup, bağlantı noktalarına göre isimlendirilmiştir. Burada, $F_{FT} = -F_{TF}$ olduğu varsayımı ile F_{T3} bilinmeyen kuvveti hesaplanabilir. Tibianın ağırlık merkezi C_T kabul edilip m_T kütlesi, tibia'ya uygulanan T_T torku ve α_T açısal ivme ve ω_T açısal hızı etkisi ile x yönünde hareket ettiği varsayılırsa, kuvvet denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [1].

$$\begin{aligned} F_{FT} + F_{T3} &= m_T \cdot a_{CT} \\ T_T + (R_{TF} \times F_{FT}) + (R_{T3} \times F_{T3}) &= I_{CT} \cdot \alpha_T \end{aligned} \quad (2.10)$$



Şekil 2.3. Diz altı kemiklerinin serbest cisim diyagramı

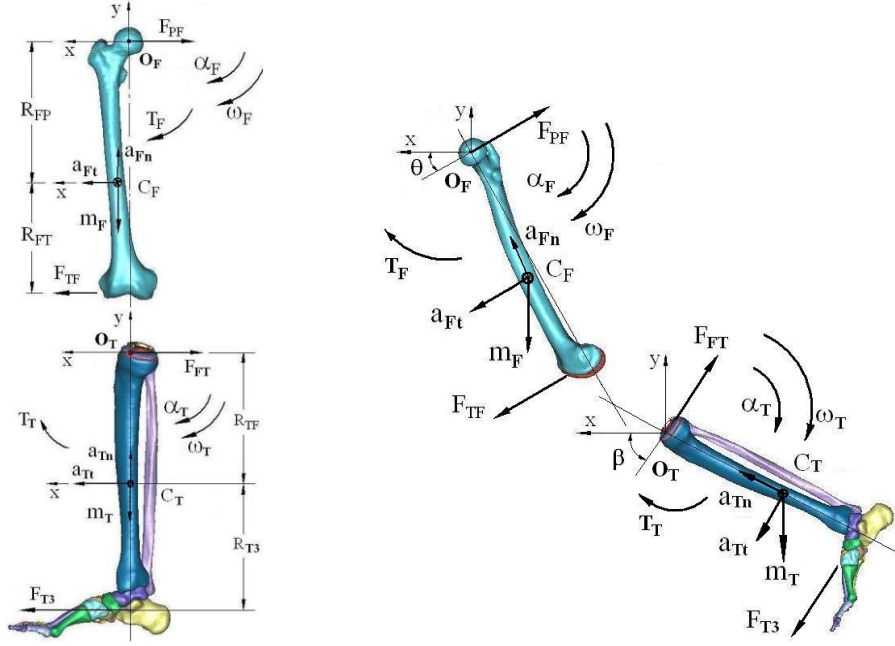
$$\begin{aligned}
 F_{FTx} + F_{T3x} &= m_T \cdot a_{CTx} \\
 F_{FTy} + F_{T3y} &= m_T \cdot a_{CTy} \\
 T_T + (R_{TFx} F_{FTy} - R_{TFy} F_{FTx}) + (R_{T3x} F_{T3y} - R_{T3y} F_{T3x}) &= I_{CT} \cdot \alpha_T
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Denklem 2.11 ile ifade edilen kuvvet ve tork denklemleri femurda olduğu gibi $[A] \times [B] = [C]$ matris formatında yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -R_{T3y} & R_{T3x} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{T3x} \\ F_{T3y} \\ T_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_T \cdot a_{CTx} - F_{TFx} \\ m_T \cdot a_{CTy} - F_{FTy} \\ I_{CF} \cdot \alpha_T - [R_{TFx} F_{FTy} - R_{TFy} F_{FTx}] \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

Tibia üzerine tesir gösteren kuvvetlerin (W_T ve N_T) uygulama noktaları ile C_T ağırlık merkezi arasındaki yer vektörleri R_{TW} ve R_{TN} olarak ifade edilmektedir. Burada, eklem ve kemik yapıların birbirlerine karşı sürtünme kuvveti etkileri ele alınmadan tibia ile ilgili kuvvet ve moment denklemleri (denklem 2.13) aşağıdaki gibi yazılabilir [1]. Bu geliştirilen denklemler, yine $[A] \times [B] = [C]$ matris formatında yazılarak bilinmeyenler için çözüme ulaşılabilir (Şekil 2.4).

$$\begin{aligned}
 F_{PF} + F_{TF} + W_T + N_T &= m_T \cdot a_{CT} \\
 T_F + (R_{FP} \times F_{PF}) + (R_{FT} \times F_{TF}) + (R_{TW} \times W_T) + (R_{TN} \times N_N) &= I_{CT} \cdot \alpha_T
 \end{aligned} \tag{2.13}$$



Şekil 2.4. Diz eklemi kemikleri anlık (V. yürüme aşaması) serbest cisim diyagramı [1]

III. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, insan iskelet yapısının alt ekstremité olarak tanımlanan, kalça eklemi ile birlikte diz ve ayak eklemi oluşturulan elemanların yapısı yürüme döngüsü ele alınarak incelenmiştir. Özellikle insan diz eklemi yapısı ve diz eklemi oluşturulan elemanlar ile bu yapıların çalışma prensipleri, yük taşıma fonksiyonları incelenmiş olup, kinematik davranışları analiz edilmiştir. Hareket düzeni içerisinde diz eklemi çalışmasına ve yük taşıma kapasitesine etkileri araştırılmıştır. Hasarlı yapıların düzeltilmesi, cerrahi operasyonlara öncülük edebilmek, bilgisayar ortamında operasyon öncesi planlamaya kılavuzluk edebilecek ve mekanik çözümleri ifade edilerek alternatif düzeltme tasarımları için formüller elde edilmiştir.

Modellerin üzerinden bilgisayar destekli analiz (simülasyonlar) ile de desteklenerek elde edilen kinematik çözümlerin sonlu elemanlar analizlerinde ve mekanik gerçek ortam testlerinde sınır şartlarının belirlenmesine de öncülük etmesi amaçlanmıştır.

Modellerin hasarlı yapılar ele alınarak çeşitlendirilmesi ileriki çalışmalar için planlanmıştır. Böylelikle yapısal hasarlı femur ve tibia kemiklerinin mekanik çözümleri de yapılabilecektir.

IV. KAYNAKLAR

[1] A. Özkan, "İnsan diz mekanizmasının bilgisayar destekli üç boyutlu modellenmesi ve kinematik analizi", Doktora Tezi, Makine E. Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye 2010.

[2] Y. Üstüner, "Total diz artroplastisi erken dönem sonuçları", Tıp Uzmanlık Tezi, Haseki Eğitim ve Araştırma Hastanesi Ortopedi ve Travmatoloji Kliniği, İstanbul, 2006.

- [3] D.C. Henry, N. Scott, "Anatomy surgery of the knee third edition", Churchill Livingtone 2., 2001, ss 13-71.
- [4] R.D. Lockhart, G.F. Hamilton, F.W. Fyfe, "Bones and joints of lower limb anatomy of the human body", Faber Ltd., 1959, pp. 113-143.
- [5] D. A. Neumann, D.A., "Kinesiology Of The Musculoskeletal Systems", Knee. In Neumann, D.A.,. Mosby-Year Book, Inc, 1st Ed., St. Louis 2002, pp. 434-476.
- [6] J.L. Guyton, "Arthroplasty of ankle and knee, campbell " S. Operative Orthopaedics. 9th Edition", Mosby-Year Book, Inc., St.Louis, 1998, pp. 232-295.
- [7] M. Enercan, "Total diz artroplastisi orta dönem sonuçlarımız", Uzmanlık Tezi, Ortopedi ve Travmatoloji Kliniği, Dr. L.K. Kartal Eğitim ve Araş. Hastanesi, İstanbul, Türkiye, 2004.
- [8] M. Tew, I.W. Forster, "Effect of knee replacement on flexion deformity" *Journal of Bone Joint Surg.* 67-B.14, 1985.
- [9] F.H. Gunston, "Polycentric knee arthroplasty prosthetic similation of normal knee movement" , *Journal Of Bone Joint Surg.* 53-B.272, 1971.
- [10] F.G.Girgis, J. Marshall, L. Monajemarsa "The cruciate ligaments ofthe knee joint, anatomical, functionaland experimental analysis," *Clin Orthop.*, vol. 106, pp. 216–231, 1975.
- [11] M. Odensten, J. Gillquist. "Functional anatomy of the anterior cruciate ligament and a rationale for reconstruction", *The Journal off Bone And Joint Surgery*, vol. 67, no. 2, pp. 257-262, 1985.
- [12] B. Mahaisavariya, K. Sitthiseripratip, J. Suwanprateeb, "Finite element study of the proximal femur with retained trochanteric gamma nail and after removal of nail" *Internatioanl Journal of The Care Of The Injury*, 37, 778-785, 2006.