



İNSAN VE ALT UZUV DIŞ İSKELET ROBOTUN MATLAB SIMMECHANICS ORTAMINDA MODELLENMESİ VE ETKİLEŞİM KUVVETLERİNİN MİNİMİZE EDİLMESİ KONTROL ÇALIŞMASI

Özgür BAŞER*, Bahri ŞEKERCİ, Hasbi KIZILHAN, Ergin KILIÇ

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Dış iskelet robotlar</i> <i>MATLAB-SimMechanics</i> <i>Kuvvet Kontrol Algoritması</i>	Son zamanlarda insan-dış iskelet robot etkileşim alanında umut verici ilerlemeler kaydedilmektedir. Tipik bir fiziksel kullanıcı-robot etkileşimi olarak, sağlıklı bir kullanıcının performansını arttırmak ya da fonksiyonları azalmış olan kullanıcılara yürüme desteği ve yürüme rehabilitasyonu sağlamak amacıyla dış iskelet robotlar geliştirilmiştir. Bu cihazlar performans artırma çalışmalarında kullanıcılara herhangi bir engel çıkarmadan ya da onların hareketlerini sınırlamadan insan anatomisi ile uyumlu bir şekilde ve aralarında minimum etkileşim kuvveti oluşturarak şekilde hareket etmelidirler. Özellikle askeri uygulamalarda dış iskelet robotun sırtına yerleştirilmiş bir yükün robotun kendi ağırlığı ile birlikte kullanıcıya hissettirilmeden taşınması gerekmektedir. Bu bağlamda bu çalışmada daha önceden Geyer, (2010) tarafından oluşturulmuş 2 boyutlu bir insan modeli geliştirilerek insan-dış iskelet robot üzerinde etkileşim kuvvetlerini azaltma çalışması yapılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikli 3 boyutlu bir insan modeli oluşturulmuştur. Bu insan modeli iki ayak, iki alt ekstremit ve bir gövdeden oluşan toplam beş zincirden meydana gelmektedir. Gerçek insan modeline en yakın sonuçlar elde edebilmek için kütlesi yaklaşık 66,75 kg ve boyu 190 cm olan erkek bir bireyin düz bir zeminde yürüme verileri alınmış ve 1 m/s hız ile yürütülmüştür. Geyer, (2010) tarafından oluşturulmuş 2 boyutlu insan modeli 3 boyutlu olarak geliştirildikten sonra, bir dış iskelet robot modeli elde edilmiştir. İnsan modeli üzerine bu dış iskelet model giydirilerek yeni bir insan-dış iskelet robot model yapısı oluşturulmuştur. İnsan-dış iskelet robot model üzerinde ilk önce herhangi bir kontrol olmadan yürüme çalışması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra eklem (aya bileği, diz ve kalça) için tanımlanan bir geri besleme kuvvet/tork kontrolü insan-dış iskelet robot model üzerine uygulanmış ve elde edilen sonuçlar kontrolsüz durum ile karşılaştırılmıştır.

MODELING OF THE HUMAN-EXOSKELETON ROBOT IN MATLAB SIMMECHANICS AND STUDY OF CONTROL FOR MINIMIZING INTERACTION FORCES

Keywords	Abstract
<i>Exoskeleton Robot,</i> <i>MATLAB-SimMechanics,</i> <i>Force Control Algorithm,</i>	Recently, many promising advancements have been recorded in the field of human-exoskeleton robot interaction. As a typical physical user-robot interaction, exoskeleton robots have been developed to augment power of a healthy user or provide walking support and rehabilitation for paralyzed patient. These devices should provide flexible movement on human anatomy by using any obstacles or limiting their movement in terms of minimum interaction force law. Especially in military applications, a robotic robot placed on the back of an exoskeleton robot needs to be transported with its own weight without being felt by the user. In this study, based on a created 2D human model, which is inspired by Geyer (2010), a three dimensional (3D) human-exoskeleton robot is enhanced to drastically reduce

* İlgili yazar / Corresponding author: ozgurbaser@sdu.edu.tr, +90-246-211-0822

interaction forces between them. For this purpose, the human model is created by consisting of two feet, two lower extremities and a trunk. In order to collect correct data from 3D human-exoskeleton robot model against human model, walking data of an individual male, a weight of 66.75 kg and a height of 1.90 cm, was run across a road at a speed of 1 m/s. After 2D human model created by Geyer has been developed as 3D, the exoskeleton robot model is covered on the human model and a new human-exoskeleton robot model is re-created. A walking exercise was carried out on the human-exoskeleton model without any control. Then, a defined feedback force control was applied on the human-exoskeleton model and the results are compared with uncontrolled state.

Alıntı / Cite

Baser, O., Sekerci, B., Kızılhan, H., Kılıç, E., (2018), İnsan ve Alt Uzuv Dış İskelet Robotun Matlab Simmechanics Ortamında Modellenmesi ve Etkileşim Kuvvetlerinin Minimize Edilmesi Kontrol Çalışması, Journal of Engineering Sciences and Design, 6(3), 365-374.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Özgür BAŞER, 0000-0002-7284-9797

Bahri ŞEKERCİ, 0000-0002-9762-3073

Hasbi KIZILHAN, 0000-0001-9433-0171

Ergin KILIÇ, 0000-0002-3099-0303

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 17.01.2018

Revizyon Tarihi / Revision Date 04.06.2018

Kabul Tarihi / Accepted Date 26.07.2018

Yayın Tarihi / Published Date 30.07.2018

1. Giriş

Dış iskelet robot kullanıcıyı destekleyen ve onu dış çevreden koruyan bir yapı olarak ifade edilmektedir. Kullanıcı tarafından giyilebilen dış iskelet robotları, kullanıcıya destek sağlama ve yük taşıma kabiliyetinin artmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca bu robotlar yürüme engelli ya da yaşlı kişilerde yardımcı uzuv, felçli kişilerde rehabilitasyon ve sağlıklı bireylerde güç artırımı amacıyla kullanılmaktadırlar (Banala vd., 2006; Agrawal vd., 2007; Rahman vd., 2004). Dış iskelet robotların bu amaçları gerçekleştirebilmesi için dış iskelet robot ile alt uzuv eklemlerinin uyumlu bir şekilde çalışması gerekmektedir. Özellikle yük taşıma uygulamalarında insan-dış iskelet robot arasındaki etkileşim kuvvetleri minimum seviyeye düşürülmelidir. Bu amaçla dış iskelet robot ile insan alt uzuv eklemlerinin dinamik analizi ve kinetiği uygun bir şekilde yapılmalıdır (Demiray vd., 2014). İnsan hareketlerinin bu analizlerini gerçekleştirebilen çeşitli ticari ve akademik yazılım bulunmakta olup (Lee, 2006), son zamanlarda hem karmaşık olmayan insan hareketlerinin hem de insan üzerine giydirilen dış iskelet robot hareketlerinin analiz ve benzetim edilmesinde MATLAB SimMechanics® yazılımı kullanılmaktadır (Hang ve Zhaoli, 2011; Daumas vd., 2005; Hajny ve Farkasova, 2010; Amca vd., 2010). MATLAB SimMechanics® mekanik sistemlerin fiziksel karşılıklarını görselleştirebilen bir benzetim ara yüzdür. Bu paket programda birçok mekanizma gerek fiziksel model olarak gerekse de bu fiziksel modelin görselleştirilmiş hali olarak oluşturulabilir ve ileri dinamik, ters dinamik, kinematik vb. analizler yapılabilir.

MATLAB SimMechanics® yazılımı kullanılarak literatürde farklı dinamik modelleme, analiz ve simülasyon (benzetim) çalışmaları yapılmıştır. Bu

çalışmaların bazıları tasarlanan cihazların analizi ve kontrolü üzerine odaklanmışlardır. Singla vd. (2016), rehabilitasyon cihazları için dört-çubuk mekanizmaya sahip mekanik bir yapının MATLAB SimMechanics® tabanlı kontrolünü ortaya koymuşlardır. Mekanik yapının tasarımı CAD yazılımında ve kontrol stratejisi SimMechanics yazılımında gerçekleştirilmiştir. Kılıç ve Doğan (2017), dirsek bölgesinde tendon yırtığı olan hastaların rehabilitasyonu ve günlük aktivitelerini gerçekleştirebilmesi için tasarlanmış olan aktif bilek ortezinin kinematik ve kinetik analizi SimMechanics yazılımında gerçekleştirilmiş ve elde edilen SimMechanics model üzerinde empedans ve admitans denetim algoritmaları uygulanmıştır. Literatürde yapılan çalışmaların bazıları ise insan yürüme hareketleri ve alt uzuv dış iskelet robotların kinematik analizi ve yürütülmesi üzerine odaklanmışlardır. Serbest vd. (2012) tarafından insan oturup kalkma hareketinin SimMechanics yazılımında dinamik modellenmesi ve benzetim çalışması sunulmuştur. Geyer, (2010) tarafından SimMechanics yazılımında 2D yürüyen insan modeli ortaya koyulmuştur. Bu model insan hareketini taklit etmede gerçekçi bir biyomekanik modelleme yaklaşımı sunmaktadır. Benzer şekilde, engelli çocuklar için tasarlanan bir yürüme egzersiz cihazını çocuklar üzerinde denemeden önce cihazın test ve kontrolünü gerçekleştirmek için bir ara platform olarak NAO insansı robot kullanılmış ve robotun kontrol sistemi Simmechanics yazılımında inşa edilmiştir (Wang vd., 2016). Rehabilitasyon amacıyla alt uzuv dış iskelet robotun modelleme sürecini optimize etmek ve düzenlemek için, SolidWorks/ SimMechanics tabanlı dış iskelet robot modelleme prosedürünü ortaya koymuşlardır. Zhang vd. (2018) alt uzuv dış iskelet robot için zaman-gecikme tahmini ile modelsiz bir sinir ağ yapısı önermişlerdir. Yine diğer bir çalışmada, önerilen bir dış iskelet robot tasarımının kontrolcüsünü test etmek ve doğrulamak için SolidWorks ve SimMechanics entegrasyonu

kullanılmıştır (Liv vd., 2012). Yine kablolar ile sürülen başka bir robotun yürüme egzersizi esnasında robot tarafından uygulanan hareketi hesaplamak için SimMechanics yazılımı kullanılarak bir MATLAB model geliştirilmiş ve elde edilen SimMechanics dinamik benzetim ile hastanın alt uzvu kontrol edilmiştir (Lamine vd., 2017).

Bu çalışmada Geyer (2010) tarafından ortaya koyulan 2D yürüyen insan modeli temel alınarak geliştirilen 3D insan modeli üzerine, insan modeline benzer bir dış iskelet giydirilerek oluşturulan insan-dış iskelet model üzerinde farklı benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kontrollü ve kontrolsüz benzetim sonuçlarına göre etkileşim tork değerleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, sistem modellemeye ziyade, MATLAB SimMechanics® ortamında benzetim çalışmaları ile kuvvet/tork geri beslemeli kontrol algoritma sonuçları değerlendirilmiştir.

2. İnsan Modeli Özellikleri ve Blok Diyagramları

2.1. İnsan Modelin Özellikleri

Simmechanics yazılımında oluşturulacak insan modeline ait özelliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Burada oluşturulacak insan modeli iki ayak, iki alt ekstremit ve bir gövdeden oluşan toplam beş zincirden meydana gelmektedir. İnsan modelinin antropometrik parametreleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. İnsan modeline ait antropometrik parametreler

	Boy (cm)	Kütle (kg)
İnsan	190	66,75
Ayak	20	1.25
Baldır	50	3.5
Uyluk	50	8.5
Gövde	70	53.5
Cinsiyet	Erkek	

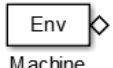
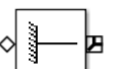


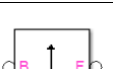
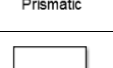

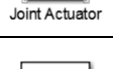
Bu çalışma sagittal düzlemdeki insan alt uzuv eklemlerine odaklanmıştır. Bu yüzden ayak bileği, diz ve kalça eklemlerinin hareketler oranları dikkate alınarak bir yürüme döngüsü oluşturulmuştur. Bu amaçla Perry (1992) tarafından belirlenmiş hareket oranları incelenmiş ve insan modeli üzerinde bu hareket oranlarına elde edilmeye çalışılmıştır. Buna göre ayak bileği eklemi sagittal düzlemde 20° plantar-fleksiyon ve 10° dorsal-fleksiyon hareketi yapmaktadır. Diz eklemi yürüme çerimi boyunca 70° fleksiyon hareketi geçirirken, kalça eklemi 10° ekstansiyon ve 30° fleksiyon hareketleri geçirmektedir (Perry, 1992).

2.2. MATLAB SimMechanics Yazılımında Blok Diyagramlarının Oluşturulması

İnsan vücudunun biyomekanik olarak incelenme aşamasında uzuv-eklem modelleri tercih edilmektedir. İnsan vücudunun mekanik yapısını ortaya koyan bu modeller, insan sisteminde bulunan kas sistemi, kıkırdak doku ve sinir sistemi gibi bileşenlerin göz ardı edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada insan vücudunun farklı bileşenlerini dikkate almadan sadece eklem-uzuv modeli kullanarak bir insan modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan insan modeli ayak, baldır, uyluk ve gövde olmak üzere 7 uzuvdan oluşmaktadır. İnsan modeli MATLAB SimMechanics® yazılımında oluşturulmuş ve model oluşturma işlemine geçmeden önce yazılımında kullanılan blok diyagramlar bu bölümde anlatılmıştır.

Simmechanics yazılımında oluşturulacak insan modeli için insanı oluşturan bileşenler bu bölümde irdelenmiştir. Model oluşturma işlemine, öncelikli olarak çevre (machine environment) bloğu eklenerek başlanmıştır. Bu blok her Simmechanics ortamında olması gereken bir blok olup, benzetim ortamını tanımlamak için kullanılmaktadır. Zemin (ground) bloğu oluşturulacak modelin başlangıç koordinatlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Body bloğu bir uzvun boyutlarını, atalet tensörünü, kütesini ve ağırlık merkezini tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu blok zemin bloğuna doğrudan bağlanamayıp, araya mutlaka bir mafsal bağlantısı yerleştirilmelidir. Model oluştururken istenilen uzuv kadar body bloğu ve bu bloklar arasında istenen hareketleri sağlayabilecek mafsal bağlantıları yerleştirilmelidir. İki adet uzvu birbirine bağlamak için kaynak (weld) bağlantısı kullanılmakta olup, bu bağlantı iki uzvu rijit olarak birbirine bağlamaktadır. Ayrıca oluşturulan modeli bir mafsaldan tahrik etmek için eklem eyleyicisi kullanılırken, tahrik neticesinde oluşan hareket durumunu gözlemlemek için eklem sensörü kullanılmaktadır. Modeli oluşturulurken kullanılan tüm bileşenler Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Temel SimMechanics bileşenleri

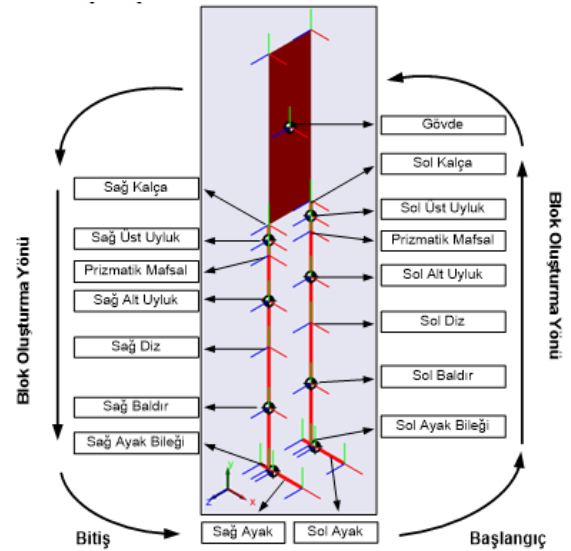
Blok	İsim	Açıklama
 Machine Environment	Çevre	Yerçekimi, sistemi çözümlenme metodları ve tolerans verilerini içerir
 Ground	Zemin	Tüm sistemin başlangıç koordinatlarını içerir
 Body	Uzun	Uzuvları (ayak, baldır, uyluk, gövde) temsil eder
 Revolute	Dönel Mafsal	Eklemeleri (ayak bileği, diz, kalça) temsil eder
 Prismatic	Prizmatik Mafsal	İki farklı uzuvdan oluşan uyluk uzununun lineer olarak uzayıp kısılmasını sağlar
 Weld	Kaynak	İki uzunun birbiri ile rijit olarak bağlantısını sağlar
 Joint Actuator	Eklem Eyleyicisi	Eklemelere tork tahrikini sağlayan elektrik motorunu temsil eder
 Joint Sensor	Eklem Sensörü	Eklemelerden elde edilen dataların (konum, hız, ivme) okunmasını sağlayan sensörü temsil eder

3. İnsan Modelinin Oluşturulması

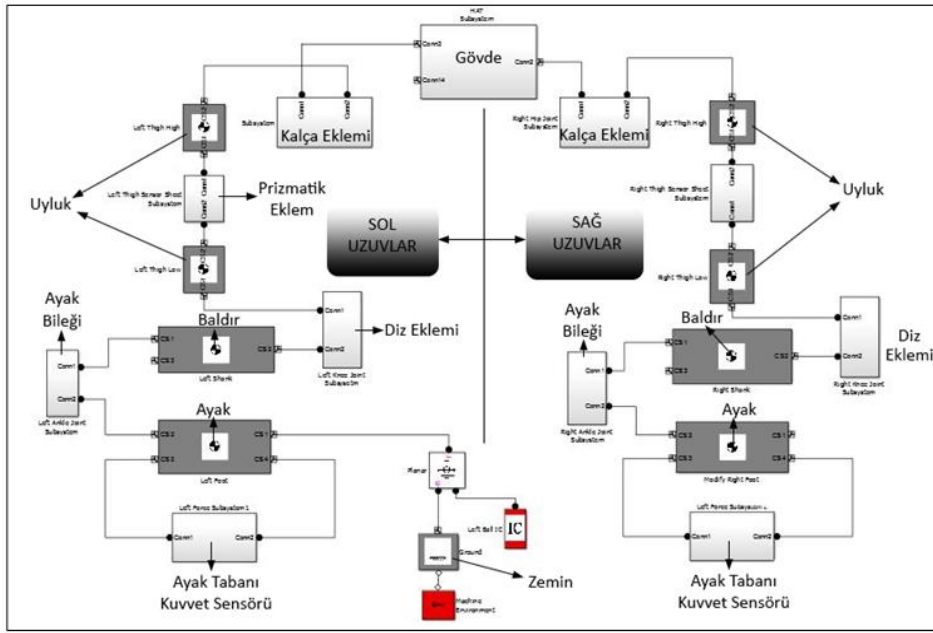
Alt uzun dış iskelet robotun sanal ortamda yürütülme işlemi zor bir süreçtir. Bu nedenle dış iskelet robotun sanal ortamda yürütülebilmesi için yürüyen bir insan modeline ihtiyaç vardır. Bu amaçla Gayer tarafından ortaya koyulmuş olan nöromüsküler yürüme modeli çalışmanın başlangıç aşamasında bir örnek insan modeli olarak alınmıştır. İnsan anatomisine benzer bir yapı oluşturmak için bu model üzerinde gerekli modifikasyonlar yapılmış ve 3D bir insan model haline getirilmiştir. Böylece insan modelinin sağ ve sol uzuvları daha belirgin hale getirilmiştir. Ancak bu model sadece sagittal düzlemde hareket edecek şekilde basitleştirilmiştir, buna karşılık düzgün bir yürüme elde edebilmek için baldır uzvu uzayıp kısılabılır halde tasarlanmıştır. Böylece insan-robot modelinin sağ yana ve sol yana yalpalamasının önüne geçilmiş ve bu yalpalamaların doğuracağı zorluklar bertaraf edilmiştir.

SimMechanics yazılımında insan modelinin blok diyagramlarının oluşturulması ilk olarak insan-zemin

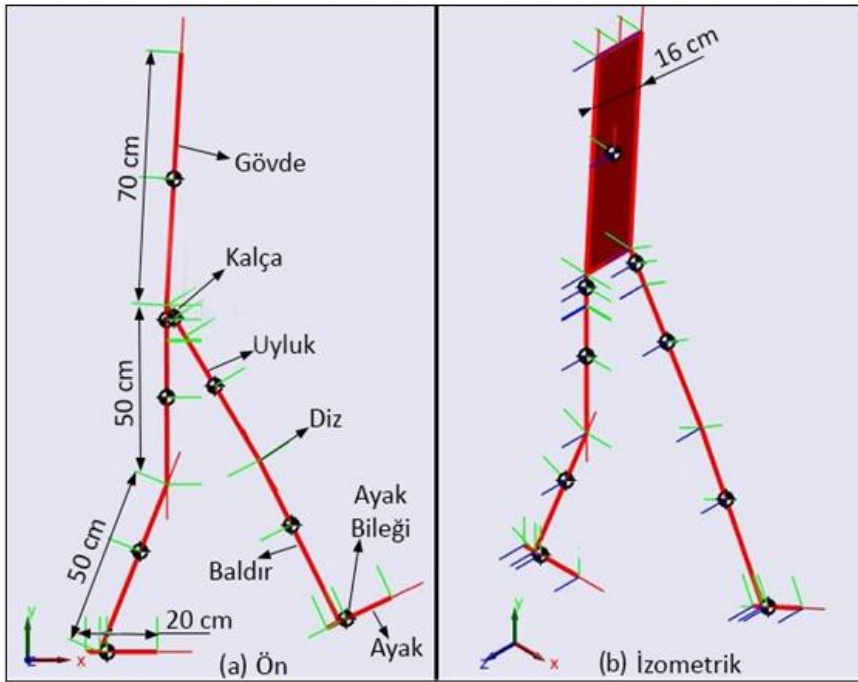
arasındaki temasın modellenmesi ile başlamıştır. İnsan-zemin arasındaki bu bağlantı z eksenini etrafında dönebilen ve x-y düzleminde hareket serbestliğine sahip bir mafsal ile sağlanmıştır. Daha sonra zemin ile temas eden ayak uzvu oluşturulmuştur. Burada ayak x-y düzleminde serbest olarak hareket ettiği için y düzleminde yer çekiminden dolayı ayak uzununun boşluğa düşmesini engellemek amacı ile bir zemin platformu oluşturulmuştur. Daha sonrada her bir uzun aynı şekilde oluşturulmuştur. Ayak ile baldır bağlantısı sadece z eksenini etrafında dönebilen bir mafsal ile sağlanmış olup, bu bağlantı şekli baldır ve uyluk uzuvları arasında da kullanılmıştır. İnsan modeli oluşturma işlemi sol ayaktan başlanmış olup, sol baldır, sol uyluk, gövde, sağ uyluk, sağ baldır ve ayak şeklinde devam etmiştir. İnsan modeli oluşturma sırasında izlenen adım Şekil 1 'de gösterilmiştir. Şekil 1' de görüldüğü gibi, bu insan modeli 17 adet bileşenden meydana gelmektedir. Tüm modelin tek bir MATLAB/Simmechanics dosyasında gösterilmesi karmaşıklığa neden olacağından, model üzerinde sadeleştirme işlemleri gerçekleştirilmiş ve alt sistemler oluşturulmuştur. Oluşturulan alt sistemler ile insan modelinin genel diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir. Sağ ve sol uzuvlar ayrıca belirtilerek sistemin daha kolay anlaşılması sağlanmıştır. Oluşturulan insan modelinin ön ve izometrik benzetim görüntüsü Şekil 3'te ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Bu insan modelinin yürütülmesi işleminde ise Geyer (2010) tarafından sunulan nöromüsküler yürüme modeli aynen kullanılmıştır. Bu çalışma yeni bir nöromüsküler insan yürüme modeli geliştirmekten ziyade, var olan bir nöromüsküler model üzerine insan-robot etkileşim benzetim çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 1. İnsan modelinin oluşturulma sırası



Şekil 2. İnsan modelinin genel blok diyagramı



Şekil 3. İnsan modelinin benzetim görüntüsü; (a) ön, (b) izometrik

3.1. Dış İskelet Robotun İnsan Modeli Üzerine Giydirilmesi

Bölüm 2.1'de kurulan insan modelinin başarılı bir şekilde çalıştığını gördükten sonra dış iskelet robot modeli kurulumuna geçilmiştir. Dış iskelet robotun oluşturulma sırası, insan modeli ile paralel olarak gerçekleştirilmiştir. Böylece insan-robot etkileşimi için gerekli bağlantılar sistematik olarak tekrarlanmıştır. Dış iskelet kurulan insan modelinin ayak uzvundan başlayarak ayak bileği, baldır, diz, uyluk, kalça ve son olarak da sırt bölgesine giydirilmiştir. Bu giydirmiş işleminin ilk adımı olarak, dış iskelet robotun sol ayak uzvu (body block) kurulmuştur. İnsan modeli kurulumu gerçekleştirilirken, sol ayak uzvu ile zemin bağlantısı

yapılmıştı. Ancak burada insan modelinin zemin ile bağlantısı kesilmiş olup, bunun yerine dış iskelet modelin zeminle bağlantısı sağlanmıştır. Bunun yapılmasındaki amaç, insan modeli üzerine giydirilen dış iskelet robotun insana eklenen ağırlığı taşıyacak olmasıdır. Bu sayede dış iskelet robotun güç artırımı amacıyla kullanılabileceği gösterilmiş olacaktır.

İnsan modeli üzerine dış iskelet robot giydirilirken, sol uzuvlar için +z yönünde 0.05 m, sağ uzuvlar için ise -z yönünde 0.05 m mesafede bırakılmıştır. Böylelikle insan uzvu ile dış iskelet robot uzuvlarının çakışma durumu ortadan kaldırılmıştır. İnsan ve dış iskelet modelde ayak uzvu 0.5 m uzunluğa sahip olup, bunlar birbirine bir ara katı bağlantı ile birleştirilmiştir.

3.2. Kuvvet Geri Beslemeli Kontrol Algoritması

Dış iskelet robot uzuvları ile insan uzuvlarının birbirleriyle olan bağlantılarından dolayı yürüme sırasında aralarında etkileşim kuvvetleri oluşmaktadır. Bu etkileşim kuvvetleri bazı durumlarda bütün ağırlığın dış iskelet robota binmesine sebep olurken, bazı durumlarda ise bütün ağırlığın insana binmesine sebep olmaktadır. Bu bölümde kontrol algoritmasının amacı, oluşan etkileşim kuvvetlerini telafi ederek sıfırlayabilmektir. İnsan modeli üzerine adapte edilen dış iskelet robot birçok uzuvdan oluşması nedeni ile karmaşık bir yapıya sahiptir. Örneğin ayak uzvunda oluşan kuvvetin telafi edilip bir üst uzuv olan baldır uzvunun eklenmesi halinde yeni eklenen baldır uzvunun, daha önce kontrolü sağlanan ayak uzvuna ekstra olarak kuvvet etkisi olacaktır. Bu nedenle kontrolü gerçekleştirilen uzuv sayısı arttıkça daha önceden kontrolü sağlanan uzuvların kontrolü zayıflayacaktır. Kısacası kontrolün gerçekleştirilmesi bütün bir sistem olarak düşünülerek etkileşim kuvvetlerinin telafi edilmesi optimum düzeyde bir kontrol gerektirmektedir.

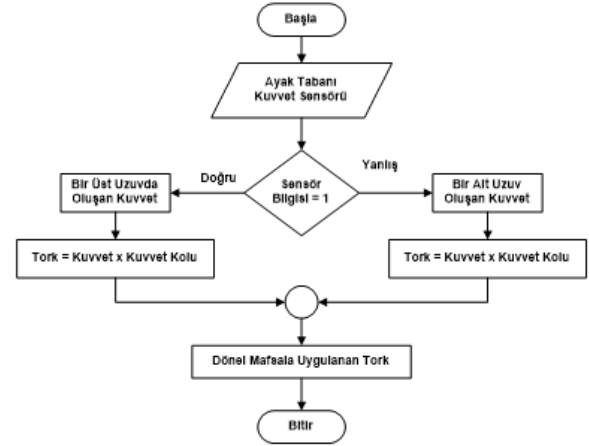
İki uzuv arasındaki etkileşim kuvvetlerinin telafi edilebilmesi, kontrolü sağlanacak olan uzvun dönел mafsallının tork eyleyicisi ile tahrik edilmesine dayanmaktadır. Burada tahrik yönü büyük önem doğru yön seçimine dikkat edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde oluşan reaksiyon kuvveti azalması gerekirken artacaktır. Bu çalışmada insan uzuvlarının ile robot uzuvları arasındaki bağlantı noktalarında, sagittal düzlemde uzuvlara dik doğrultuda kuvvet ölçümü yapan bağımsız yük hücrelerinin kullanıldığı düşünülmüştür. Böylece, her bir ekleme karşılık gelen etkileşim torkları her bir uzuvdaki yük hücresinden ölçülen kuvvet ile yük hücresi ile ilgili eklem arasındaki uzaklığın çarpımından hesaplanmaktadır.

$$\text{Etkileşim Torku} = \text{Etkileşim Kuvveti} \times \text{Kuvvet Kolu} \quad (1)$$

Buradaki kuvvet ilgili dönел mafsala bağlı olan uzvun ağırlık merkezinde oluşan kuvvet olup, kuvvet kolu ise ağırlık merkezinin dönел mafsala olan uzaklığını ifade etmektedir. Kısacası kuvvet geri beslemeli bir tork kontrol gerçekleştirilmekte olup, bu kontrol ayak bileği, diz ve kalça eklemlerinde oluşan etkileşim torkları en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

İnsan yürüme çevrimi, basma fazı (stance phase) ve salınım (swing phase) olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Kontrol algoritması da bu iki faza göre koordine edilmiştir. Ayağın topuk ve parmak ucuna yerleştirilmiş olan kuvvet sensörleri vasıtasıyla hangi ayağın yere temas ettiği ve hangisinin havada olduğu bilgisi kolayca elde edilebilmektedir. Burada ayağın yere temas etmesi halinde sensörden 1, etmemesi halinde 0 değeri okunmaktadır. Topuk veya parmak ucu sensörlerinin herhangi birinden 1 değeri gelmesi durumunda ilgili bacağın basma fazında, her ikisinden de 0 gelmesi durumunda ise ilgili bacağın salınım

fazında olduğu kabul edilmiştir. Bu sensör bilgilerine göre ilgili dönел mafsallı tahrik edecek olan motorun referans tork değeri, yine bu mafsallı ile ilgili olan yük hücresinden okunan kuvvet değerinin kuvvet kolu ile çarpımından elde edilmektedir. Tork kontrolü gerçekleştirilecek olan mafsallı için hangi yük hücresinden kuvvet bilgisinin alınacağı hangi bacağın basma fazında ya da salınım fazında olduğuna göre karar verilmektedir. Örneğin zemin ile temas eden bacağın ayak bileğinin tork tahriki, bir üst uzuv olan baldır uzvunda oluşan kuvvetin ayak bileğinde oluşturmuş olduğu tork değeri geri beslenerek gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde ayağın zemin ile hiçbir temasın olmaması durumunda da ayak bileğinin bir alt uzvu olan ayak uzvunda oluşan kuvvetin geri beslemesi ile tork tahriki gerçekleştirilmiştir. Böylece optimum düzeyde tork kontrolü başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kontrol algoritması Şekil 6'da akış diyagramı halinde verilmiştir.



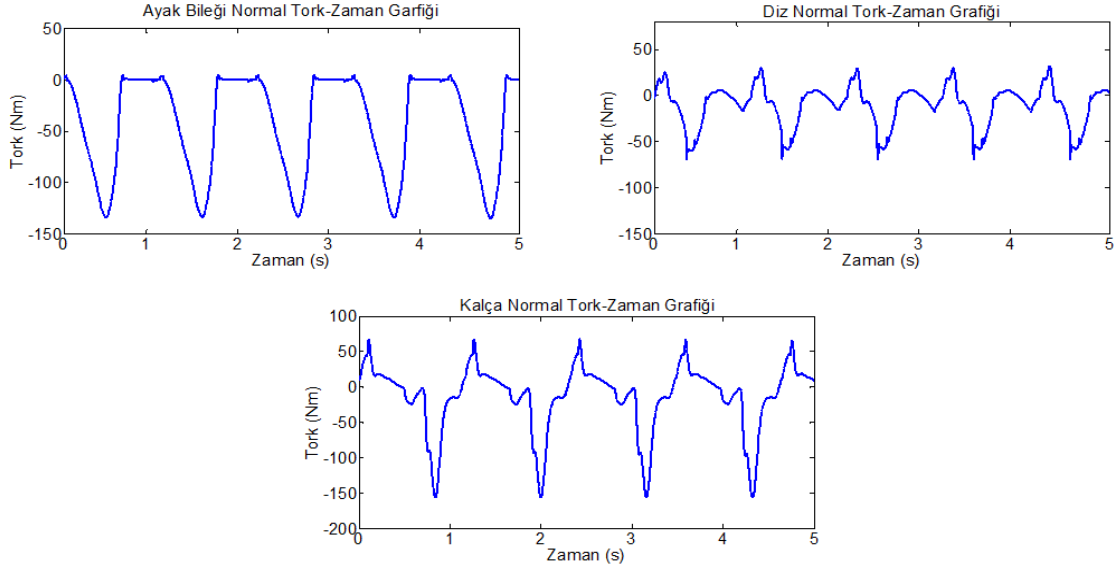
Şekil 6. Kontrol algoritması akış diyagramı

4. Benzetim Çalışmaları

Bu bölümde yürüme esnasında Simmechanics çıplak insan modeli üzerinde oluşan eklem tork değerleri ve dış iskelet modelin insan modeli üzerine giydirilmesi sonucu oluşan eklem tork değerleri sunulmaktadır. Ayrıca insan modeli üzerine dış iskelet robotun giydirilmesinden sonra, dış iskelet model üzerine Bölüm 3.2'de sunulan kontrol algoritması uygulanmış ve ölçülen eklem tork değerleri verilmiştir.

4.1.Çıplak İnsan Modelinde Oluşan Eklem Tork Değerleri

Bu bölümde yürüyen Simmechanics insan modelinin ayak bileği, diz ve kalça eklemlerinden okunan doğal tork değerleri verilmiştir. İnsan modeli üzerindeki bu eklemlerinden okunan tork değerleri 0-5 sn. için verilmiş ve sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, yürüme çevrimi sürekli aynı rejimde olmasından dolayı normal tork değerlerinin her adımda aynı değerlere ulaştığı açıkça gözlemlenmiştir. İnsan vücudu simetrik bir yapıya sahip olduğundan dolayı sadece insan vücudunun sol tarafta bulunan eklemlerdeki ölçümler verilmiştir.

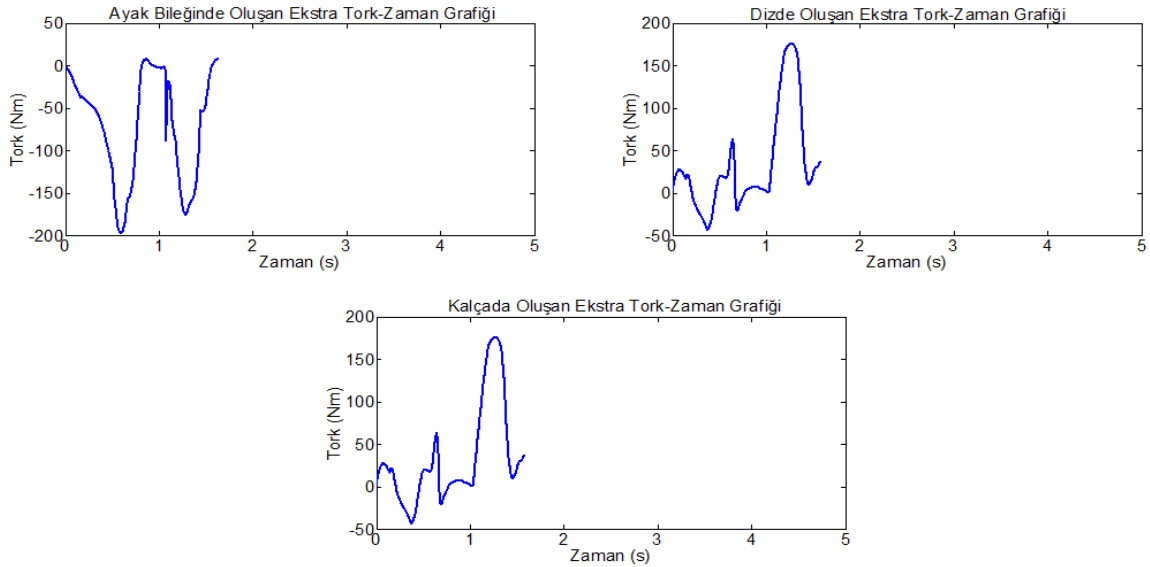


Şekil 7. Çıplak insan modelinden ölçülen ayak bileği, diz ve kalça eklemlerinin normal tork değerleri

4.2. Dış İskelet Modelin İnsan Modeli Üzerine Giydirilmesi ile Oluşan Eklem Tork Değerleri

Dış iskelet robotun insan modeli üzerine giydirilmesi ile birlikte insan-robot arasında etkileşim kuvvetleri oluşmaktadır. Bu etkileşim kuvvetleri ise insan modeline fazladan yükler bindirerek yürüyüşü zorlaştırmakta ve insan modelinin yürüyebilmesi için fazladan torklar üretmesine neden olmaktadır. Şekil 8'de üzerine dış iskelet robot giydirilmiş olan insan

modelinin ayak bileği, diz ve kalça eklemlerinde oluşan ekstra tork değerleri verilmiştir. Burada verilen grafikler 0-5 saniyelik zaman aralığında olmasına rağmen, yaklaşık olarak 1.8'inci saniyede benzetim sona ermektedir. Benzetim çalışmasının 1.8'inci saniyede sona ermesinin sebebi, dış iskelet robotun tüm ağırlığını insan modelinin taşıyamaması ve sonuç olarak, insan modelinin dengesini kaybedip düşmesidir.

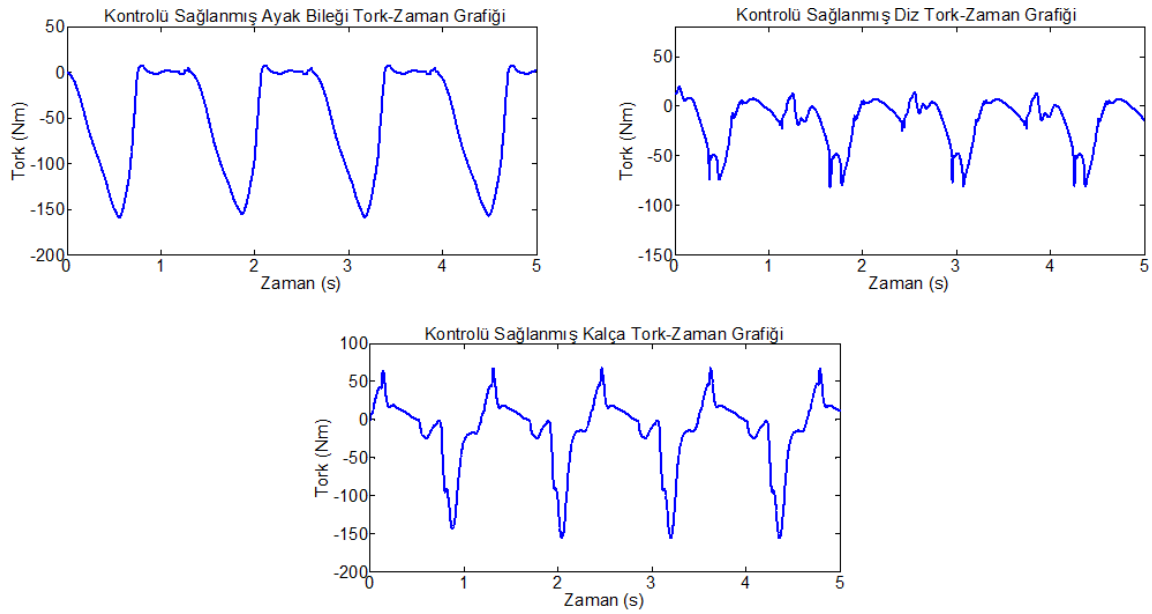


Şekil 8. Ayak bileği, diz ve kalçaya etkileyen ekstra tork değerleri

4.3. İnsan Modeli Üzerine Giydirilen Dış İskelet Model Üzerinde Kontrol Algoritması Uygulanması Sonucunda Oluşan Eklem Tork Değerleri

Bu bölümde insan modeline giydirilen dış iskelet robot üzerinde Bölüm 3.2'de sunulan kontrol algoritması uygulanmış ve elde edilen sonuçlar

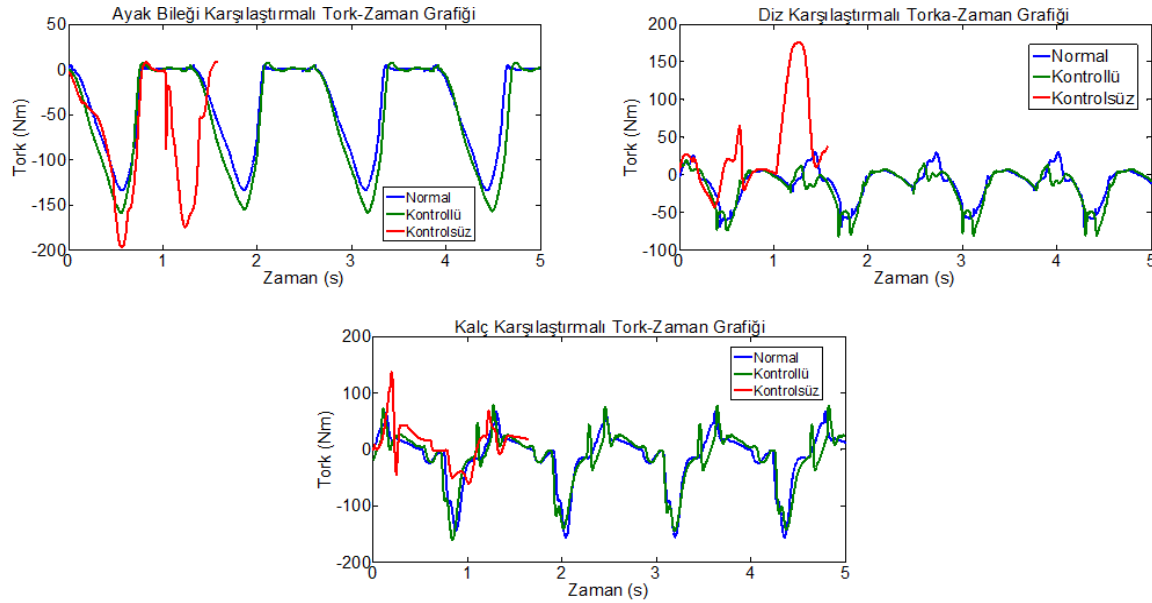
verilmiştir. Kontrol algoritması uygulanması sonucunda insan modeli eklemlerinde okunan tork değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9'dan anlaşıldığı gibi, kuvvet kontrolü uygulanması ile insan modeli üzerindeki eklem torkları tıpkı dış iskelet giydirilmeyen önceki insan modelinde olduğu gibi makul seviyelere düşürülmüş ve insan modeli düşmeden yürüme çevrimlerini tamamlayabilmiştir.



Şekil 9. Kontrol algoritması uygulanan insan modeli üzerindeki ayak bileği, diz ve kalça eklemleri için tork değerleri

Sonuçların daha anlaşılır olarak gösterilmesi amacıyla çıplak insan modeli, kontrolsüz dış iskelet robot giydirilen insan modeli ve kontrollü dış iskelet robot

giydirilen insan modelinin ayak bileği, diz ve kalça eklemlerinden ölçülen tork değerleri tekrar Şekil 10'da hep birlikte verilmiştir.



Şekil 10. Normal insan modeli, kontrolsüz dış iskelet robot giydirilen insan modeli ve kontrollü dış iskelet robot giydirilen insan modelinin ayak bileği, diz ve kalça eklemleri için tork değerleri

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada Geyer (2010) tarafından oluşturulmuş yürüyen bir 2 boyutlu nöromüsküler insan modeli temel alınarak, MATLAB/Simmechanics benzetim ortamında bir 3 boyutlu nöromüsküler insan modeli geliştirilmiştir. Bu 3D insan modelinin oluşturulma adımları takip edilerek, insan kinematik modeline benzer bir dış iskelet model oluşturulmuştur. Oluşturulan dış iskelet model insan modeli üzerine giydirilmiş, böylelikle insan-dış iskelet modelden oluşan bir yapı elde edilmiştir. Oluşturulan yapı üzerinde uygulanacak olan bir geri beslemeli kuvvet kontrol algoritması tanımlanmıştır. Çalışmanın

devamında sadece insan modeli eklemlerinin tork değerlerini ve dış iskelet giydirilen insan modeli eklemlerinin tork değerlerini bulmak için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları önceden yürüeyebilen insan modelinin üzerine dış iskelet giydirilmesi ile yürüyemez hale geldiğini göstermiştir. Çünkü insan-dış iskelet arasındaki etkileşim kuvvetleri yürüyen insan modelinin dengesini bozmuş ve yere düşmesine sebep olmuştur. İnsan-dış iskelet arasında oluşan bu etkileşim kuvvetlerini en aza indirebilmek için tanımlanan kontrol algoritması uygulanmıştır. Böylece dış iskelet giydirilen insan modeli sorunsuz yürütülebilmiş ve alt uzuv eklemlerinde oluşan ekstra torklar minimum

seviyelere indirilerek her eklemdede bağımsız kuvvet geri beslemeli tork kontrol algoritmasının etkinliği gösterilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar bu makale ile ilgili olarak 213M297 no'lu "Biyomimetik bir alt uzuv dış iskelet robotun tasarımı ve denetimi" başlıklı kariyer projesi ile finansal destek sağlamasından dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunmaktadırlar.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynakça

Agrawal S. K., Banala SK, Fattah A, Sangwan V, Krishnamoorthy V, Scholz JP & Hsu WL, 2007. Assessment of motion of swing leg and gait rehabilitation with a gravity balancing exoskeleton. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 15(3), 410-420.

Amca, A., M., Harbili, E., Arıtan, S., 2010. Koparma kaldırışının biyomekanik analizi için mekanik model geliştirilmesi, Hacettepe Spor Bilimleri Dergisi, 21, 1, 21-29.

Banala S, Agrawal K, Fattah SK, Krishnamoorthy V, Hsu WL, Scholz J & Rudolph K, 2006. Gravity-balancing leg orthosis and its performance evaluation. IEEE Transactions on robotics, 22(6), 1228-1239.

Demiray M. A., Başer Ö., Kılıç E., 2014. Alt Uzuv Dış İskelet Robot Eklemlerinde Kararlılık İçin Sönümlenme Katsayıları ve Momentlerinin Hesaplanması. Suleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Science 18(SI: Biomechanics), 35-51.

Daumas, B., Xu, W., L., Bronlund, J., 2005. Jaw mechanism modeling and simulation, Mechanism and Machine Theory, 40, 821-833.

Geyer H. 2010. Geyer Neuromuscular Model. http://www.cs.cmu.edu/~hgeyer/Research_MotorControl.html (Erişim Tarihi: 21.10.2017).

Hajny, O., Farkasova, B., 2010. A study of gait and posture with the use of cyclograms, Acta Polytechnica, 50, 4, 48-51.

Hang, S., Zhaol, M., 2011. Kinematics simulation of sit to stand based on SimMechanics, International Conference on Future Computer Science and Education, China, 59-61.

Kılıç, E., & Doğan, E., 2017. Aktif bir bilek ortezin kinematik ve kinetik analizleri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, doi: 10.5505/pajes.2017.22230.

Lamine, H., Laribi, M. A., Bennour, S., Romdhane, L., & Zegloul, S., 2017. Design Study of a Cable-based Gait Training Machine. Journal of Bionic Engineering, 14(2), 232-244.

Lee, K., 2006, CAD systems for human-centered design, Computer-Aided Design & Applications, 3, 5, 615-628.

Li Y., Wang X., Xu P., Zheng D., Liu W., Wang Y., Qiao H., 2012. SolidWorks/SimMechanics-Based Lower Extremity Exoskeleton Modeling Procedure for Rehabilitation. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering May 26-31, 2012, Volume 39 of the series IFMBE Proceedings pp 2058-2061.

Perry J., 1992. Gait analysis : normal and pathological function. Slack, Thorofare, NJ.

Rahman T, Sample W & Seliktar R., 2004. Design and Testing of WREX. Advances in rehabilitation robotics, 243-250.

Serbest K., Çilli M., Eldoğan O., 2012. Oturup Kalkma Hareketinin SimMechanics Ortamında Dinamik Modellenmesi ve Benzetimi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. Cilt 16, Sayı 3, 205-212(2012).

Singla, A., Singh, G., & Virk, G.S. 2016. Matlab/simMechanics based control of four-bar passive lower-body mechanism for rehabilitation. Perspectives in Science, 8, 351-354.

Wang, Z., Peyrodie, L., Cao, H., Agnani, O., Watelain, E., & Wang, H. 2016. Slow walking model for children with multiple disabilities via an application of humanoid robot. Mechanical Systems and Signal Processing, 68, 608-619.

Zhang, X., Wang, H., Tian, Y., Peyrodie, L., & Wang, X. 2018. Model-free based neural network control with time-delay estimation for lower extremity exoskeleton. Neurocomputing, 272, 178-188.