

# İNSAN BACAĞI HAREKETLERİ İÇİN PROTOTİP DIŞ İSKELET ROBOTİK SİSTEMİNİN MEKANİK TASARIMI VE HAREKET VERİLERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ELDE EDİLMESİ

Evren Meltem Toygar<sup>1</sup>, Ahmet Özkurt<sup>2</sup>, Zeki Kırıl<sup>1</sup>, Mehmet Çakmakçı<sup>3</sup>, Binnur Gören Kırıl<sup>1</sup>,  
Yavuz Şenol<sup>2</sup>, Taner Akkan<sup>2</sup>, Yusuf Arman<sup>1</sup>, Tolga Olcay<sup>2</sup>, Necati Mutlu Dağhan<sup>1</sup>, Murat  
Karagöz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir

<sup>2</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir

<sup>3</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, İzmir

## ÖZET

Bu çalışmada, tek alt ekstremite bozukluğu olan insan için bir dış iskelet sisteminin tasarımı ve yapay sinir ağları ile kontrolü amaçlanmaktadır. Dış iskelet sistemi, SolidWorks yazılımı kullanılarak üç boyutlu modellenmiştir. Eş zamanlı olarak insan üzerinden yürüme verileri alınmış ve ayak tabanı dörde bölünerek zeminden etkileyen tepki kuvvetleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler kullanılarak yürüme modellenip dış iskelet sisteminde oluşan gerilme ve şekil değiştirme dağılımı elde edilmiştir. Bu analizler ile kontrol aşamasında kullanılmak üzere yürüme verileri elde edilmiştir. Ayrıca ayak tepki kuvvetinin mevcut olduğu durumlar için motor güç ihtiyaçları belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yürüme analizi, alt ekstremite, dış iskelet sistemi, yürüme hareketi kontrolü

## MECHANICAL DESIGN OF PROTOTYPE EXOSKELETON ROBOTIC SYSTEM FOR HUMAN LEG MOVEMENTS AND IMPLEMENTATION OF GAIT DATA WITH NEURAL NETWORK

### ABSTRACT

Target of this study is designing a exoskeleton system for single lower extremity disabled person and controlling this exoskeleton system with neural network. Exoskeleton system is modeled by using SolidWorks. At the same time, gait data is acquired on human body and sole is divided four parts after that reaction forces are gauged during the walking. Distributions of strain and deformation are obtained by using experimental gait data. The walking is designed using the obtained data and walking data is derived for control stage. Power requirements of actuators are defined.

**Keywords:** Gait analysis, lower extremity, exoskeleton system, gait control

## 1. AMAÇ

İnsan yürüme hareketinin belirlenmesi tıp uzmanları, mühendisler ve matematikçiler için her zaman zor bir problem olmuştur. Günlük hayatta insansı robotların insan faaliyetlerine yardımcı olabilmeleri için insana yakın doğal yürümenin sağlanması gerekmektedir. Karmaşık olması nedeniyle insan yürüme şeklinin uygulanabileceği alt ekstremite destek sistemi modeli geliştirmek oldukça zordur. Bunun sağlanması için yürüme hareketinin yüksek serbestlik dereceli karmaşık modelinin basitleştirilmesi gerekmektedir. Bu sorunların üstesinden gelmek amacı ile birçok araştırmacı teorik ve deneysel çalışmalarında biped robot modeli oluşturmuşlardır [1-3]. Alt ekstremite destek sisteminin tasarımında, eklem açısı aralığı sınırlaması, bacakların kinematığı, eklem açısı hız sınırlaması, bağlantıları arasındaki temas gibi çeşitli kısıtlar bulunmaktadır. Yürümenin başlangıç süreci basınç plakaları kullanılarak elde edilen mekanik kayıtların biyomekanik analizleri ile incelenmektedir. Böylelikle, insan yürüme hareketinin dinamiği analiz edilebilmektedir [4,5]. İnsan yürüme hareketi yan, ön ve dik düzlemlerdeki dinamik hareketlerin birleşmesinden oluşmaktadır. Bipedal yürüyüşün tam bir yürüme hareketini elde etmek için yürüme analizi iki veya daha fazla düzlemde gerçekleştirilmelidir.

Yürüme hareketi temel olarak sağıtal düzlemde yer almaktadır. Sağıtal düzlemde bipedal yürüme modeli insan yürüme hareketine benzerdir. Tüm biped robotlar en fazla bu düzlemde eklem sahiptir. Bu çalışmada bu nedenle sağıtal düzlemdeki yürüme hareketi dikkate alınmaktadır. Yürüme yörüngesinin belirlenmesi düzgün bir yürüme hareketinin oluşturulmasını sağlar. Bu kararlı bir hareket için gereklidir [6,7].

Gelişen teknoloji ile dış iskelet sistemlerinde kullanılan sensör, eyleyici (aktüatör) ve kontrol ünitelerinin boyutları küçülüp güçleri artmaktadır. Dış iskelet sisteminin tasarım ve teknolojisindeki hızlı ilerlemeye rağmen, kullanımı için insan fizyolojik cevabı üzerine sınırlı veri bulunmaktadır. Bununla birlikte eklemlerin istenen kinematığını ve hareket aralığını belirleyerek, moment ve güç ihtiyaçlarının belirlenmesi mümkündür.

Bu çalışmada, tek alt ekstremite problemi olan insanlar için dış iskelet sisteminin tasarlanması ve sistemin hareketinin yapay sinir ağları ile sağlanması amaçlanmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında sağlıklı insan üzerinden bilek, diz ve kalça eklemlerinin açıları ve basma sırasındaki ayağa gelen tepki kuvvetleri elde edilmiştir. Tasarım aşamasında, kullanıcının fizyolojisine uyacak şekilde, uzunluğu ayarlanabilir, istenen yörüngelerde hareketi sağlayabilen, rijit elemanlardan oluşan üç serbestlik dereceli bir dış iskelet sistemi SolidWorks programı ile tasarlanmıştır. Elde edilen yürüme verileri doğrultusunda, kritik durumlar için dış iskelet sisteminin sonlu elemanlar yöntemine dayalı mukavemet analizleri SolidWorks Simulation programıyla gerçekleştirilmiştir. Bu analizlere göre dış iskelet sisteminin taşıyıcı kısımlarının nihai geometrisi ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Yürüme sırasında motorlara gelen moment değerlerini belirlemek için yürümenin kinematik-kinetik analizleri SolidWorks Motion ile gerçekleştirilmiştir.

## 2. YÖNTEM VE BULGULAR

Robotik bir dış iskelet ya da giysi tasarımı için öncelikle vücut mekaniği ve hareket analizlerini de kapsayan ayrıntılı bir tasarım çalışması gerekmektedir. Hedeflenen dış iskelet tasarımında karşılaşılabilecek en büyük zorluk, mekatronik teknolojisini içeren bu tarz bir çalışmanın insan vücuduna uyumunun sağlanarak gerekli fonksiyonel iyileştirmelerin yapılmasıdır. Bu bölümde bu tasarımın tamamlanması için gereken çalışmaların ayrıntılarına ve dikkat edilmesi gereken hususlara yer verilecektir.

### 2.1. Dış İskelet Sisteminin Solidworks İle Tasarlanması

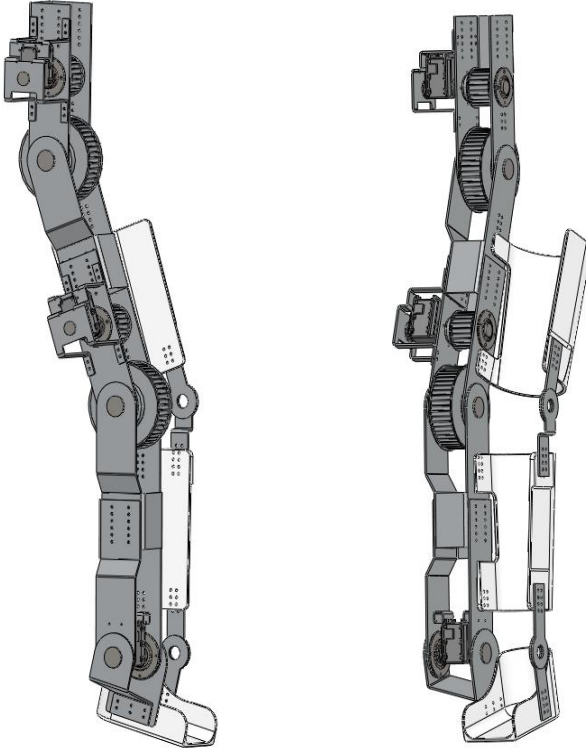
Alt ekstremite problemleri için dış iskelet sistemi tasarlanırken, sistemin ayakta durabilmesi ve hareket esnasında insan ağırlığının eklem motorlarına doğrudan etkimemesi temel prensip olarak belirlenmiştir. Sistemin taşıyıcı kısımlarının, hafiflik ve maliyet göz önünde bulundurularak Al 6000 serisi alüminyum alaşımından imal edilmesi kararlaştırılmıştır. Sistemin, farklı boydaki insanlar tarafından da kullanılabilmesi için baldır ve uyluk kısımları toplamda 10 cm'ye kadar uzayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Destek sisteminin bacağına uyumu ve hareket esnasında dış iskelet sistemi ve bacağın tek bir uzuv gibi hareket etmesi için Şekil 1'de görüldüğü gibi poliüretan malzemeden destekler kullanılacaktır [8,9]. Piyasadaki bir çok ortez-protez yapım ve uygulama merkezinin imal edebildiği bu destekler, hazır mekanik kilitler ile desteklenecek ve motorların yapabileceği ters hareketler sonucunda bacağın zarar görmesi engellenecektir. Sistem, bel bölgesinden ve bacak desteklerinden kemerler ile sıkılarak vücuda

bağlanacaktır. Dış iskelet sisteminin her ekleminde, sürtünme sonucu oluşacak kayıpları en aza indirmek ve yataklamayı sağlamak amacı ile sabit bilyalı radyal rulmanlar kullanılmıştır.



Şekil 1. Ayak-Bilek-Diz Ortezi Görünümü

Tasarımı gerçekleştirilen dış iskelet sisteminin üç boyutlu katı model görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir. Sisteme ait ölçüler ve kütle özellikleri Tablo 1’de yer almaktadır.



Şekil 2. Dış iskelet sisteminin katı model görüntüsü.

Tablo 1. Uzunluk ve Ağırlık Değişkenleri

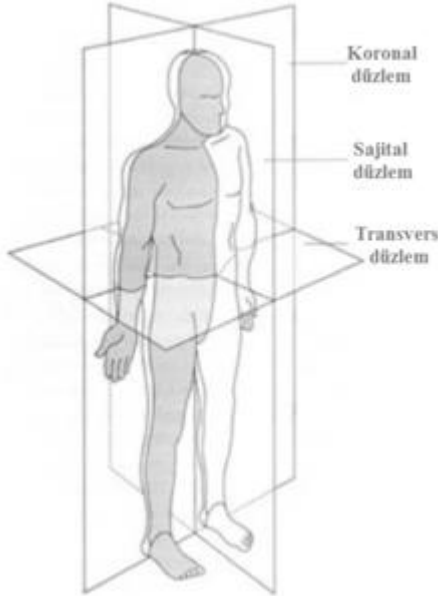
Üst Bacak Uzunluğu	370 mm+50 mm
Alt Bacak Uzunluğu	360 mm+50 mm
Bilek - Ayak Altlığı Uzaklığı	110 mm
Ayak Ölçüleri	175 mm x 83 mm
Dış İskelet Sistemi Ağırlığı	6 kg

## 2.2. Yürüme Verilerinin Elde Edilmesi

Bu çalışmada insan yürüme verileri bilgisayar ortamında tasarlanan mekanik yapıda sekiz fazlı yürüme çevrimi üzerinden benzetim yoluyla ve tasarlanan mekanik yapının boyutsal özelliklerine uygun insan denek üzerinden kalça, diz ve bilek eklemlerine yerleştirilen manyetik enkoder sensörleri ile iki farklı yolla elde edilmiştir. Aynı zamanda her iki yöntemde de taban altındaki kuvvetler yine benzetim yoluyla hesaplanmış ve yük sensörleri kullanılarak denek üzerinden deneysel olarak toplanmıştır. İki farklı yöntemle elde edilen yürüme açı değerleri kullanılarak en uygun yürüme çevrimi ortaya çıkarılmaya ve bilgisayarlı kontrol sistemine entegre edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan çalışmada benzetim verilerinin deneysel verilerle benzer olmasına karşın, deneysel verilerin adım mesafesi, kişinin temposu, zemin gibi değişkenlere oldukça bağlı olduğu görülmüştür. Bu durumda çalışmanın ileri aşamasında gerçekçi bir yürüme sonucu için dinamik yaklaşımlı bir adım kontrol algoritması gerektiği görülmektedir. Bu algoritmanın da iki şekilde olması mümkündür. Birinci yaklaşımda, benzetim yoluyla elde edilen yürüme verilerinin baz alındığı ancak anlık olarak kişinin yürüme hızı, zemin ve itme çekme kuvvetleri gibi dış rahatsız edici etkiler, motor moment gereksinimleri, IMU (Inertial Measurement Unit) kartından alınan yunuslama açıları ve ayak altı kuvvet sensörleri bilgileri ile düzeltilerek kişiye uygun hale getirilebilir. Mevcut çalışmada bu yöntem üzerinde denemeler yapılmıştır. İkinci yaklaşımda ise; kişiye özel bir yürüme verisi toplanabilir ve daha doğal bir yürüme elde edilebilir. Bu yöntemde de yürüme verisinin daha önceki yaklaşımdaki gibi anlık olarak hız, dış etkiler, kuvvetler ve yürüme yunuslama açı düzeltilmesine ihtiyaç olacağı açıktır. İkinci yaklaşım için insan deneklerden çift bacadan sayısal eklem açıları ve ayak altı kuvvet sensörleri yoluyla veri toplayacak sistem de tasarlanmıştır.

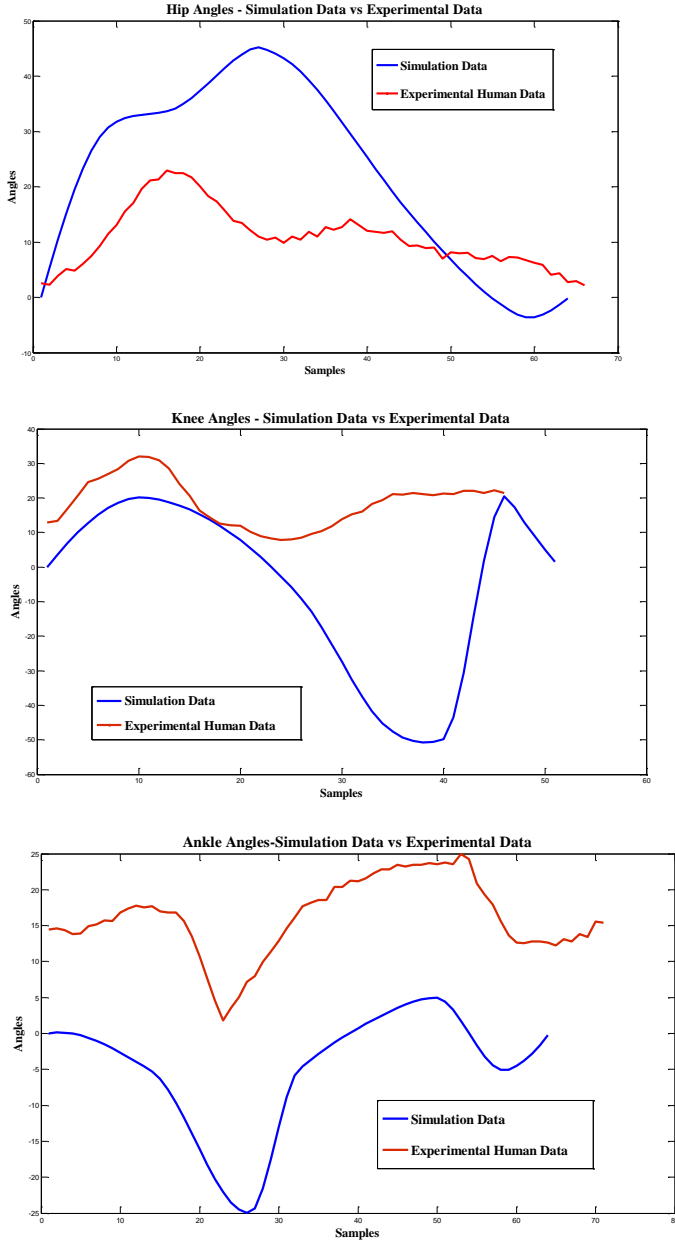
Dış iskelet sisteminin tasarım sürecinde, eklem motorlarına hareket verisi sağlamak ve sistemin statik ve dinamik analizlerini gerçekleştirmek amacıyla, sağlıklı insanlar üzerinden sağıtal düzlemde (Şekil 3) yürüme verileri alınmış ve basma sırasında ayak tabanına gelen kuvvetler ölçülmüştür.



Şekil 3. Anatomik düzlemler.

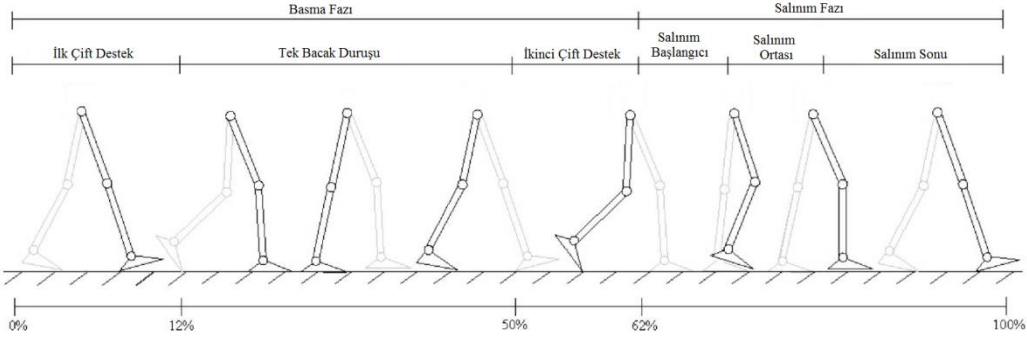
Ölçümlerde 165 cm boyunda ve 65 kg ağırlığında bir kişinin beş dakikalık yürüme süresi boyunca 5000 satır veri alınmıştır. Bir satır veride o anki durum için diz, kalça ve bilek açıları ile ayak tabanının dört farklı bölgesine zeminden gelen tepki kuvvetleri ölçülmüştür. Bu veriler içerisinde en çok tekrarlananlar dikkate alınmış ve analizler bu değerler ile gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmada, benzetim yoluyla alınan veriler ve deneysel veriler arasında aşağıdaki Şekil 4’de görüldüğü gibi farklar bulunmaktadır. Açısal farkın mekanik sistemin referans açıları ile deneysel kısımda kullanılan sensörlerin yön farklılığından kaynaklandığı, ayrıca genlik farkının kişiden kişiye değişebildiği görülmektedir; benzetim koşullarının deneysel ortam koşullarını tam olarak sağlanamaması da farkın oluşumunda etkindir.



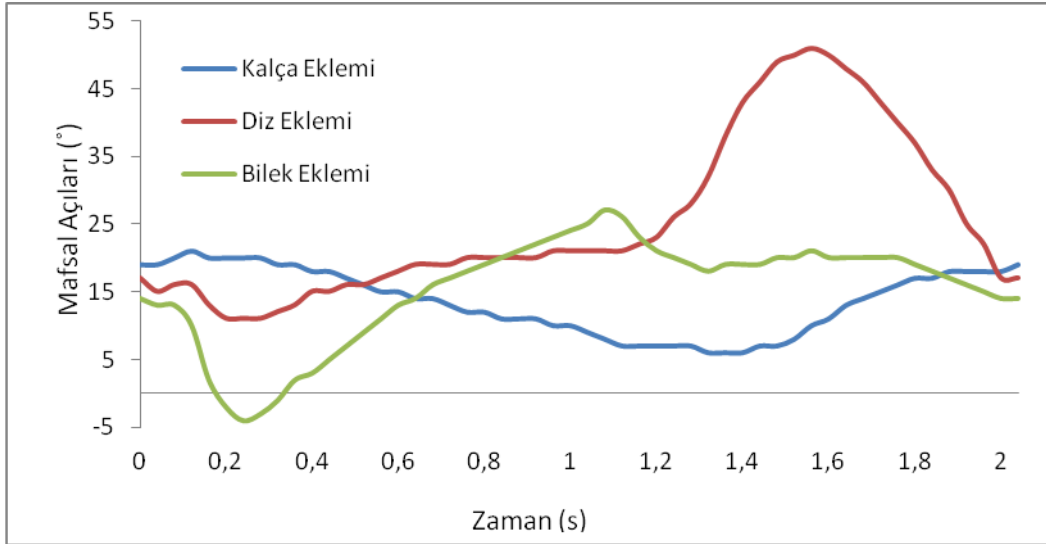
Şekil 4. Bir Yürüme Çevrimine Ait Açısal Konumlar: Deneysel ve benzetim veri farklılıkları

Şekil 5, bir yürüme çevrimindeki sekiz ayrı fazı ve çevrim içerisindeki oluşum zamanlarını yüzde olarak göstermektedir.

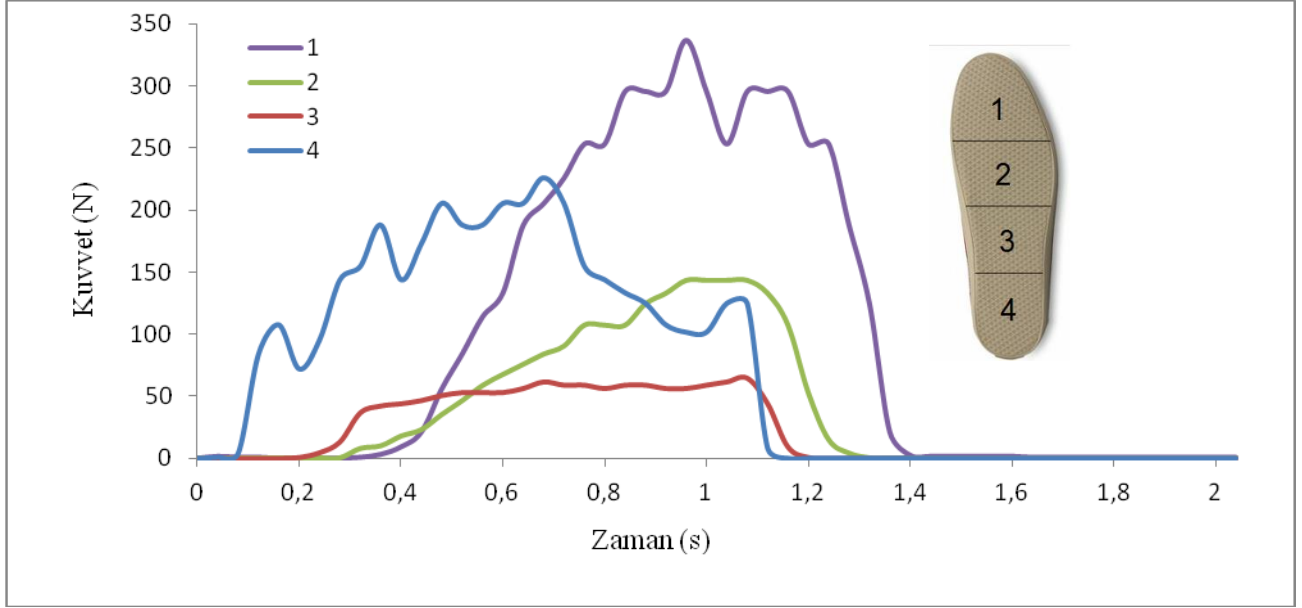


Şekil 5. 8 Fazlı yürüme çevrimi ve yüzdeleri.

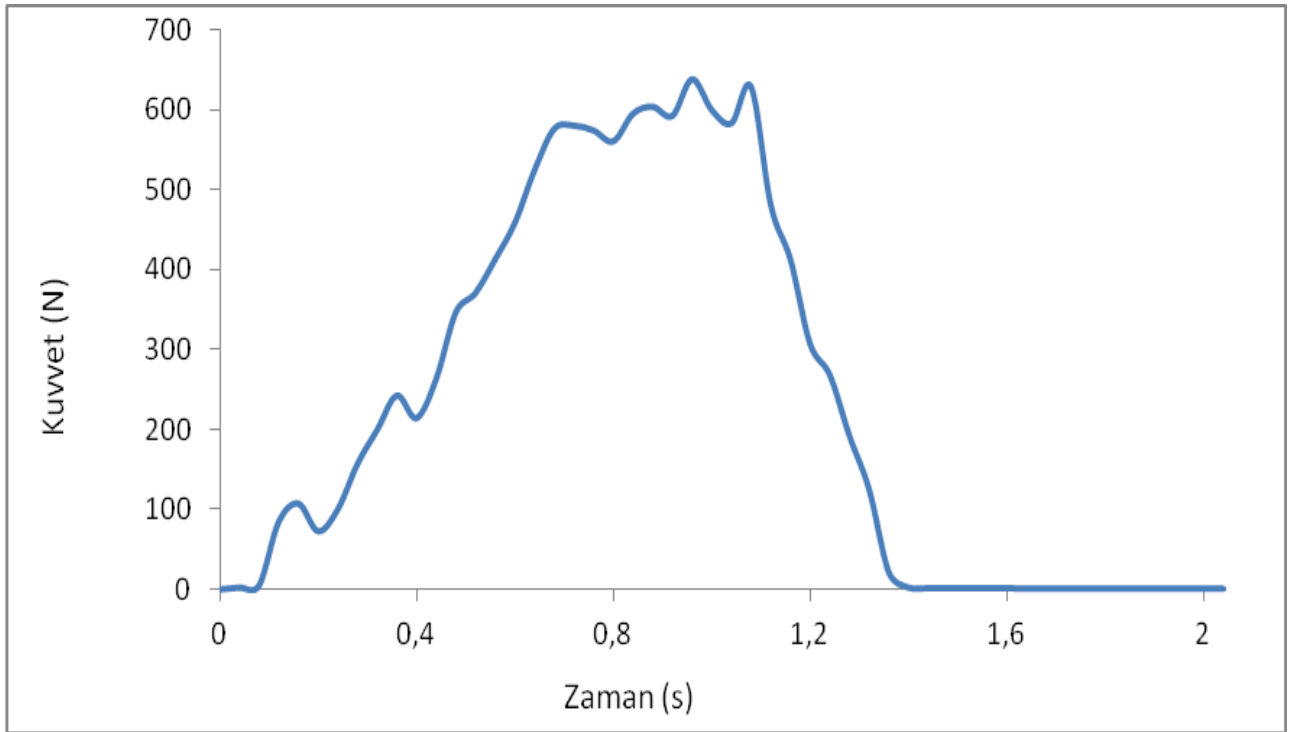
Şekil 6'da SolidWorks Motion yazılımı ile elde edilmiş bir yürüme çevrimine ait açısal konumlar verilmiştir. Bir yürüme çevrimi boyunca ayak tabanının dört farklı bölgesine zeminden etkileyen tepki kuvvetlerinin zamana göre değişimi Şekil 7'de görülmektedir. Dört bölgeden ölçülen kuvvetlerin toplam değeri Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 6. Bir yürüme çevrimine ait açısal konumlar.

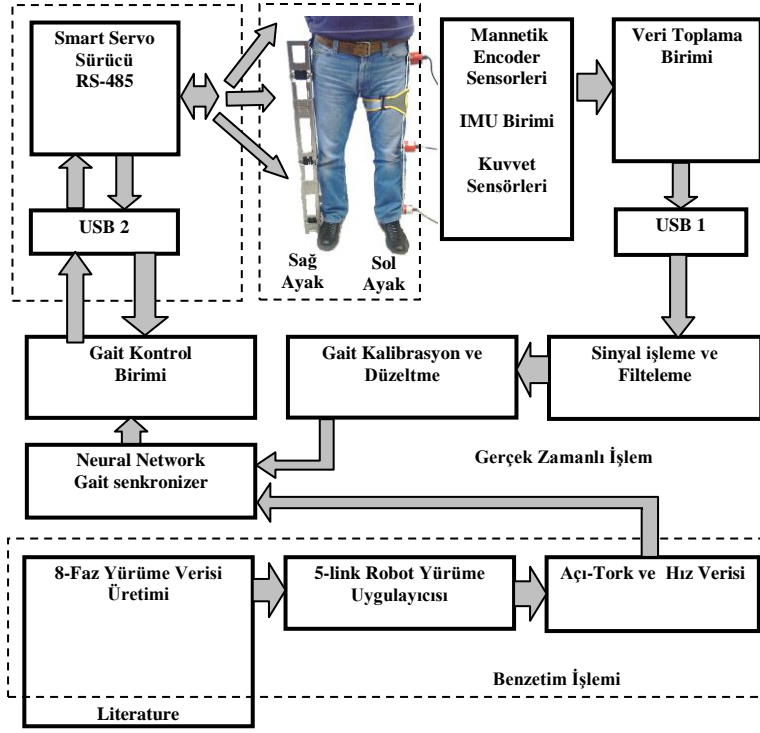


Şekil 7. Ayak tabanına etkiyen kuvvet değerleri.



Şekil 8. Ayak tabanına etkiyen toplam kuvvet.

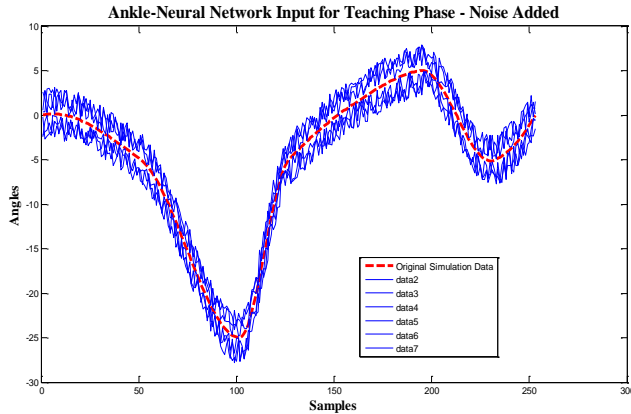
Bu çalışmada kullanılan sistem blok diyagramı Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Sistem blok diyagramı

Blok diyagramda görüldüğü gibi benzetim verisi esas alınarak oluşturulan temel yürüme verileri, manyetik enkoderler yardımıyla alınan anlık eklem açıları, IMU donanımıyla bel bölgesinden toplanmış yunuslama, yan yatma, yükseklik değişimi ve zemin açı değişimi bilgileri ve ayak altı çoklu nokta kuvvet sensörlerinden sağlanan basma kuvvetleri ile gerçek zamanlı olarak değerlendirilerek düzeltilmiş ve yapay sinir ağı temelli bir yürüme senkronizasyon birimi ile mekanik sisteme uygulanacak hale getirilmiştir. Bu noktada sağ ve sol bacağın benzetim yoluyla belirlenen temel yürüme fazlarının hangi evresinde olduğunun hızlı ve güvenli şekilde belirlenmesi amacıyla senkronizasyon işlemi gereklidir. Bu yönetime alternatif olarak değişik yürüme verisi arama-eşleme yöntemleri denenmişse de en uygun, en etkin ve hızlı sonuçlar yapay sinir ağı sistemi ile sağlanmıştır.

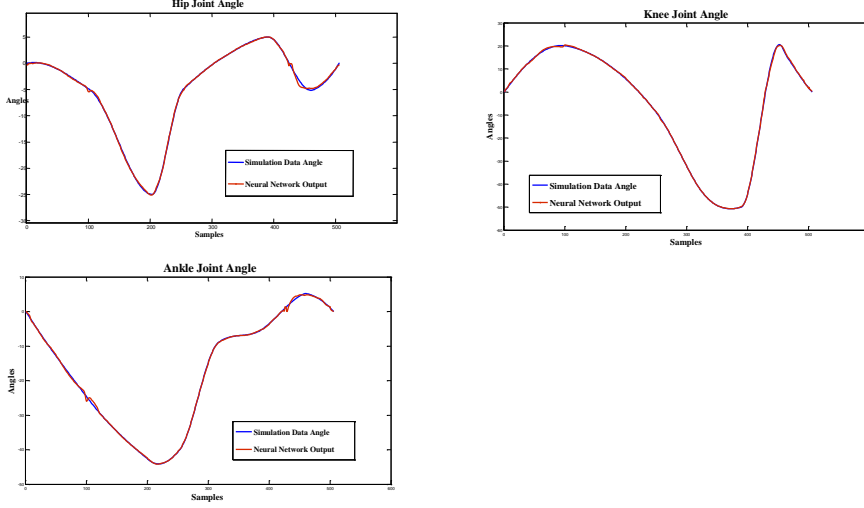
Yapay sinir ağı sistemi tarafından eğitilen yürüme verisi, 2 saniye süre ile referans yürüme fazlarının temel alındığı sekiz noktanın bilgisayar ortamında B-Spline Interpolasyon yöntemi ile örneklendirilmiş 500 açı bilgisi içeren bir veri setidir. Bu verinin yarısı eğitim yarısı da test amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca eğitim verisinde kullanılan kısım altı adet gürültülü versiyon halinde eğitilerek yukarıda belirtilen dış etkiler ve kişiye bağlı eklem açı değişikliklerinde yürümenin etkilenmesi önlenmiş ve bu sayede gürültüye bağışıklık ve genelleme yapılması sağlanmıştır. Şekil 10'da gürültü eklenmiş eğitim verisi görülmektedir.



Şekil 10. Yapay sinir ağı eğitim verisi.

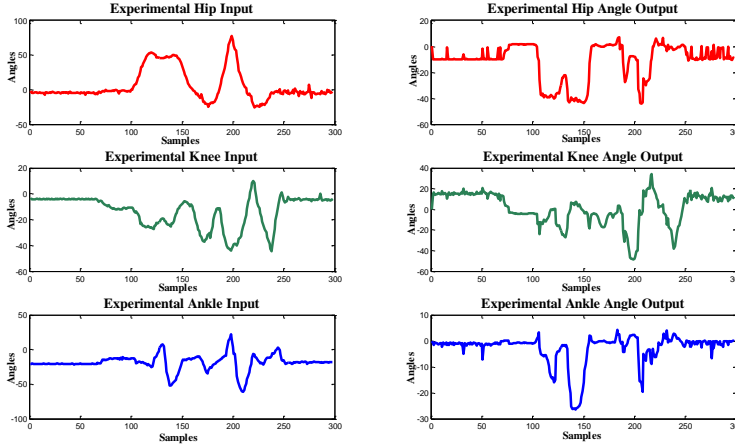


Çalışmada kullanılan yapay sinir ağı yapısı, 16 ve 9 nöronlu iki gizli katman içeren bir network yapısıdır. Eğitim fonksiyonu Levenberg-Marquardt olup, 2000 denemede hata 0.1 civarındadır. Şekil 11’de eğitim verisi ve test edilen verinin yapay sinir ağı girişine uygulandığında oluşan yapay sinir ağı çıkışının grafik olarak karşılaştırması, her üç eklem için görülmektedir.



Şekil 11. Yapay sinir ağı eğitim ve sistem test verisi çıkış karşılaştırması.

Aynı zamanda, deneysel olarak manyetik enkoder ile insan üzerinden alınan bacak hareketlerine yapay sinir ağı yapısının tepkileri de Şekil 12’de verilmektedir.



Şekil 12. Deneysel olarak insan bacak hareketlerine karşı yapay sinir ağı sisteminin ürettiği motor sürme uyarımı.

### 2.3. Dış İskelet Sisteminin Statik Analizi

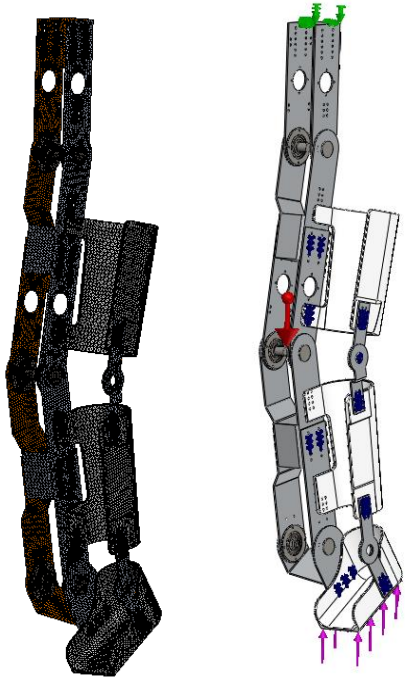
Elde edilen yürüme verileri ve yere basma esnasında ayağa zeminden gelen tepki kuvvetleri girdi olarak kullanılarak dış iskelet sisteminin sonlu elemanlar yöntemi ile statik gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen gerilme değerlerine göre taşıyıcı sistem elemanlarının mukavemet kontrolleri gerçekleştirilmiştir.

Dış iskelet sisteminin 65 kilogramlık bir insana uygulanacağı düşünülerek, sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilen üç farklı durum için, yürüme sırasında ayak tabanının dört farklı bölgesine etki eden tepki kuvvetleri ve eklem açıları Tablo 2’de verilmiştir. Sistemin sabitlendiği bölgenin bel bölgesi olduğu kabul edilmiştir. Bağlantı noktalarına 60 adet pim bağlantısı atanmıştır.

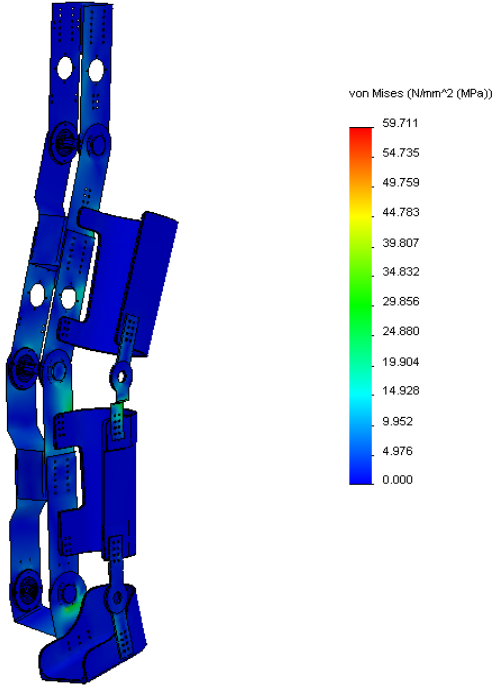
Tablo 2. Statik analiz uygulanan üç kritik durumun verileri

	1. Durum	2. Durum	3. Durum
<b>Kalça Açısı</b>	14	11	9
<b>Diz Açısı</b>	19	20	21
<b>Bilek Açısı</b>	14	22	25
<b>1. Alana Gelen Kuvvet</b>	204,9 N	336,6 N	295,4 N
<b>2. Alana Gelen Kuvvet</b>	83,9 N	143,5 N	143,5 N
<b>3. Alana Gelen Kuvvet</b>	61,1 N	55,86 N	64,1 N
<b>4. Alana Gelen Kuvvet</b>	225,47 N	101,3 N	124,6 N

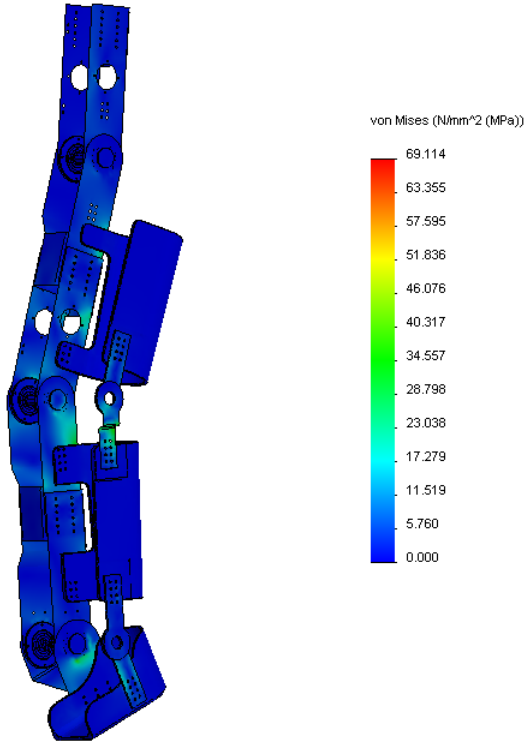
Şekil 13'de dış iskelet sisteminin sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları görülmektedir. Sonlu elemanlar modelinde 10 düğümlü üçgen prizmatik elemanlar kullanılmıştır. Mesh boyutu 6 mm olarak alınmıştır. Tablo 2'de belirtilen üç kritik durum için destek sisteminde oluşan Von Mises gerilme dağılımı Şekil 14-16'da verilmiştir.



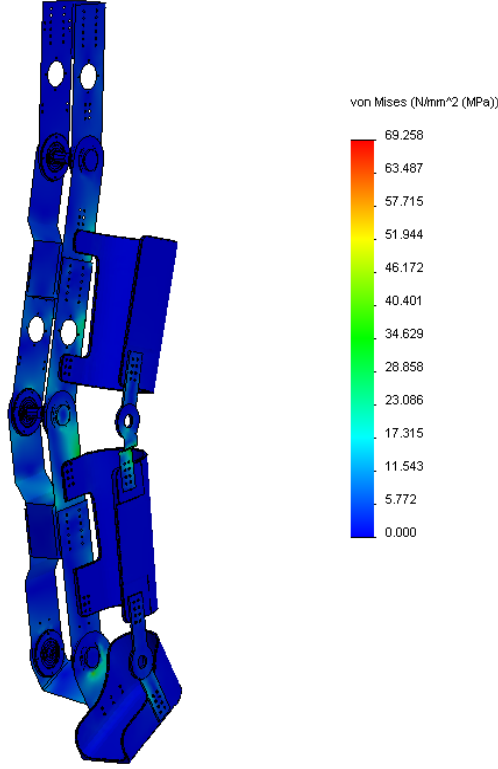
Şekil 13. Dış iskelet sistemine ait sonlu elemanlar modeli.



Şekil 14. Durum 1 için Von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 15. Durum 2 için Von Mises gerilme dağılımı.

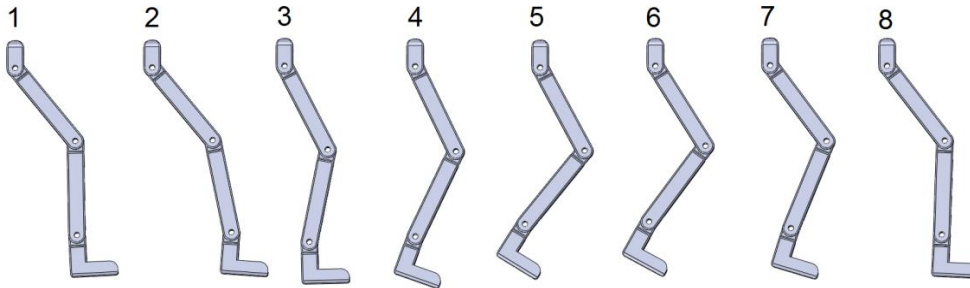


Şekil 16. Durum 3 için Von Mises gerilme dağılımı.

#### 2.4. Dış İskelet Sisteminin Kinetik Analizleri

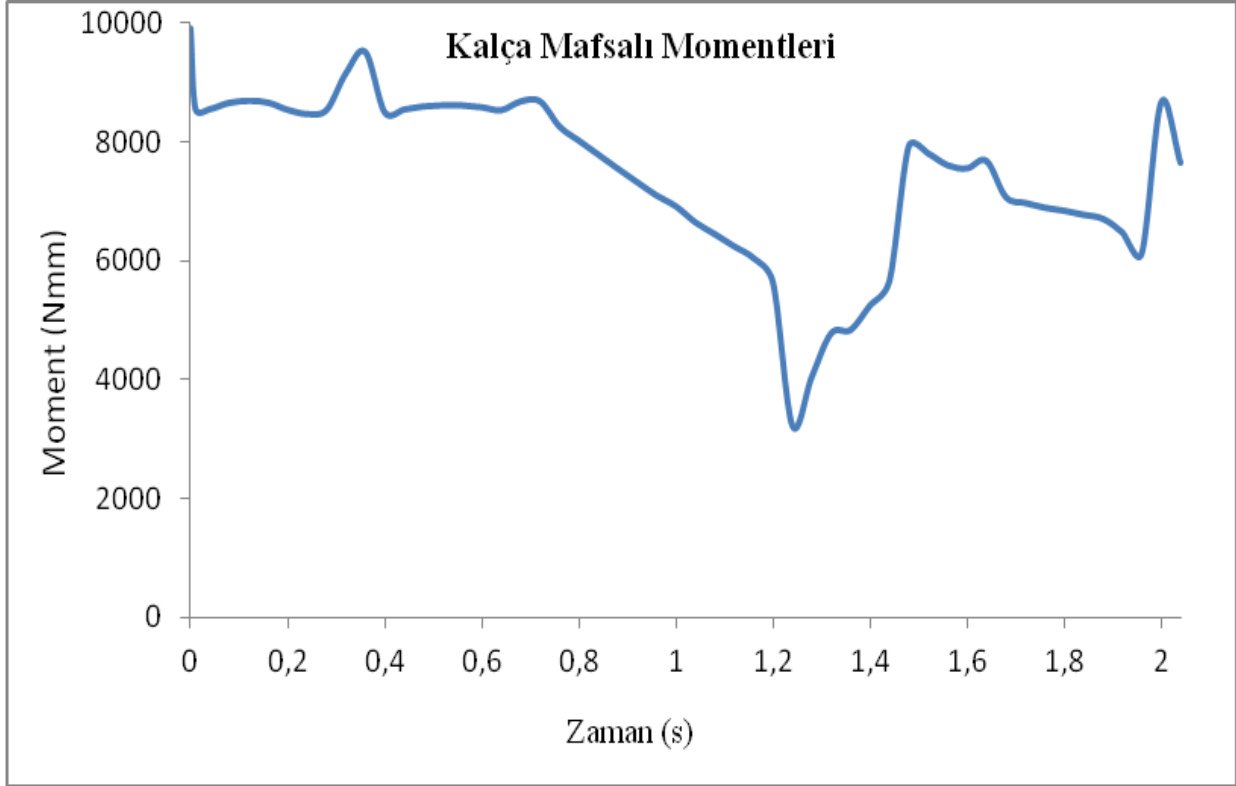
Dış iskelet sisteminin kalça, diz ve bilek mafsallarında toplam üç adet servo motor kullanılmıştır. Elektriksel uyartım ve kontrol işlemleri sırasında mafsal motorlarının karşılaması gereken moment ve güç gereksinimlerini belirlemek amacı ile dış iskelet sistemine ait katı model üzerinde SolidWorks Motion programı kullanılarak kinematik ve kinetik analizler yapılmıştır.

Sağlıklı insandan alınan yürüme verileri kullanılarak SolidWorks Motion yazılımı ile elde edilen yürüme çevrimi görüntüsü Şekil 17’de verilmiştir.

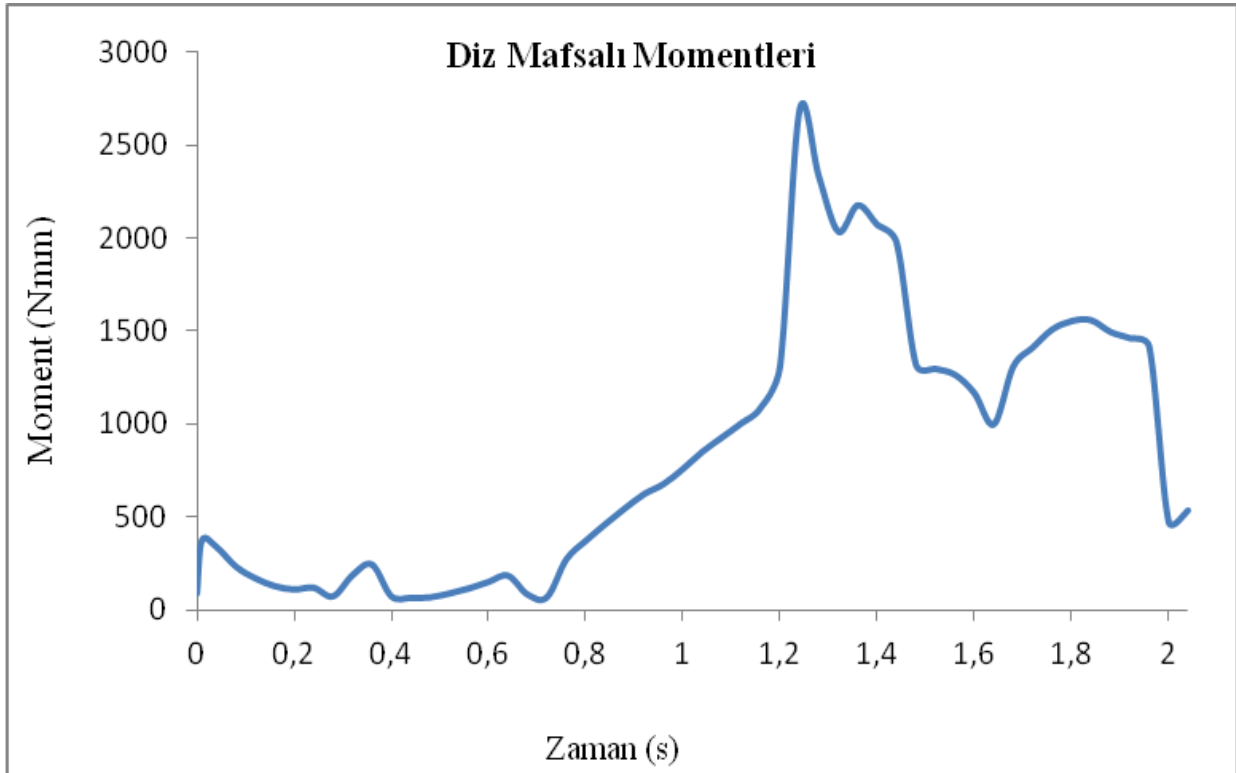


Şekil 17. SolidWorks Motion ile oluşturulan yürüme çevrimi.

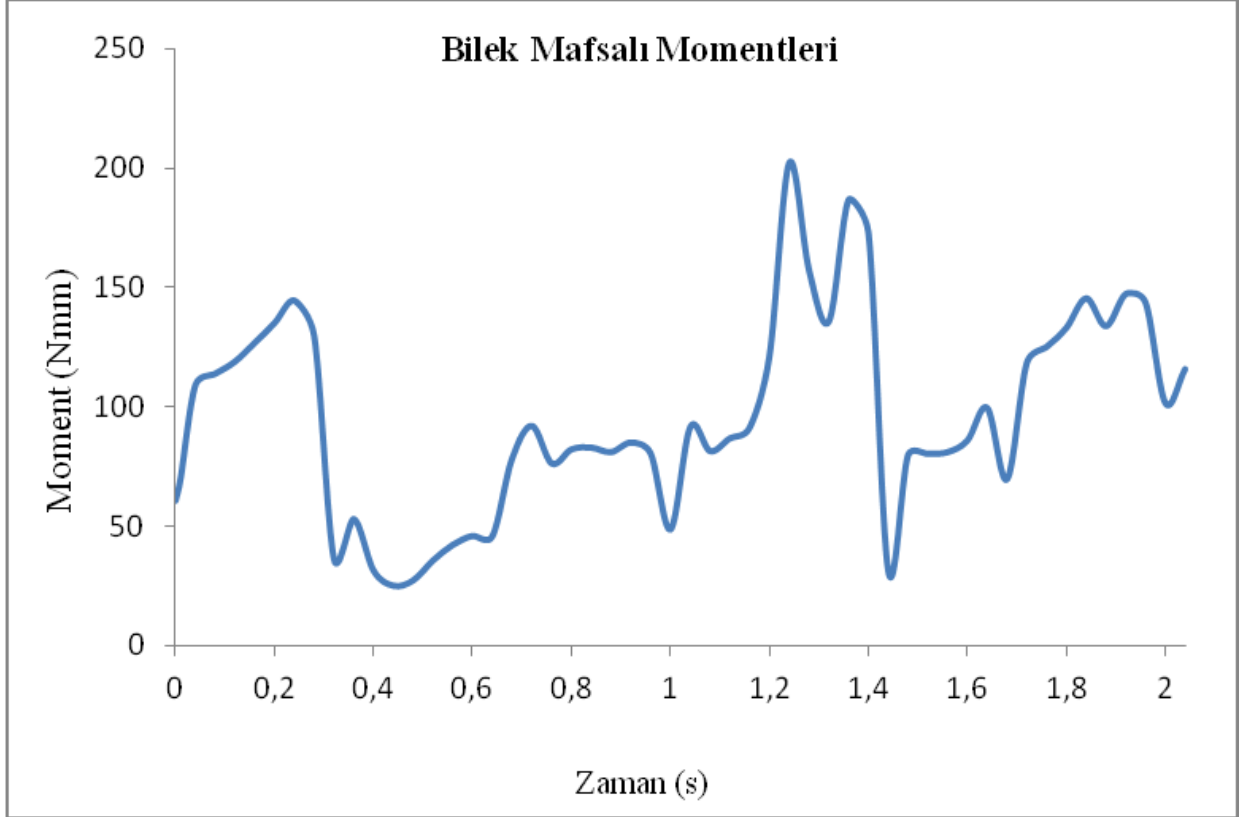
SolidWorks Motion ile gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen kalça, diz ve bilek mafsal momentleri Şekil 18-20’de verilmiştir.



Şekil 18. Kalça mafsalı moment gereksinimi.



Şekil 19. Diz mafsalı moment gereksinimi.



Şekil 20. Bilek mafsalı moment gereksinimi.

Bu şekillerden görüldüğü gibi, kalça mafsalı moment gereksinimi, beklenildiği gibi diz ve bilek mafsalına göre yüksektir. Mafsalarda kullanılan motorların maksimum tutma momenti 10.5 Nm'dir ve kalça ve diz eklemlerinde 2:1 çevrim oranında kayış-kasnak mekanizması kullanılmıştır. Bu nedenle, destek sisteminde kullanılan motorlar mafsal moment gereksinimlerini karşılayacak durumdadır.

### 3. SONUÇ

Bu çalışmada, tek alt ekstremitte bozukluğu olan insan için yürüme destek sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayak tabanına gelen tepki kuvvetleri baskı plakaları yardımıyla ölçülerek ayak tabanının dört farklı bölgesi için belirlenmiştir. Bu kuvvet değerleri sonlu elemanlar analizinde dış kuvvet olarak uygulanmış ve yürüme çevriminin farklı durumları için destek sistemi üzerindeki gerilme dağılımı elde edilmiştir.

Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda en yüksek Von Mises gerilme değerinin kullanılan alüminyum alaşımının akma mukavemetinden düşük olduğu ve tasarımın güvenli olduğu belirlenmiştir.

Eklem bölgelerinde kullanılacak motorların moment gereksinimleri SolidWorks Motion yazılımı ile belirlenmiştir. Eklem bölgesinde kullanılan dişli kayış tasarımı ile motor momentleri iki kat oranında artırılarak ilgili eklem hareketi sağlanmıştır.

İki bacak için senkron hareketin sağlanabilmesi ve bu şekilde destek sisteminin sağlıklı bacağına göre beklenen hareketi yapabilmesi için yapay sinir ağları ile eklem açısal uyarım bilgileri elde edilmiştir. Kullanılan yöntemin destek sisteminin hareket kontrolünde etkin olarak kullanılabileceği görülmüştür.

## REFERANSLAR

- [1] K. Nagasaka, H. Inoue, and M. Inaba, "Dynamic Walking Pattern Generation for a Humanoid Robot Based on Optimal Gradient Method" Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, 6, 1999, pp. 908-913.
- [2] S. Hong, Y. Oh, B. You, and S. Oh, "A walking pattern generation method of humanoid robot MAHRU-R" Intelligent Service Robotics Journal, 2(3), 2009, pp. 161-171.
- [3] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, et al., "Planning walking patterns for a biped robot" IEEE Transactions on Robotics and Automation, 17 (3), 2001, pp. 280-289.
- [4] M. A. Townsend and R. J. Lepofsky, "Powered walking machine prosthesis for paraplegics", Med. Biol. Eng. 14, 1976, pp. 436-444.
- [5] M. Vukobratovic, "Humanoid robotics — Past, present state, future" Int. J. Human. Robot., 2007.
- [6] D. Ito, T. Murakami, and K. Ohnishi, "An approach to generation of smooth walking pattern for biped robot" Proceedings of the 7<sup>th</sup> Workshop on Advance Motion Control Malibor, Slovenia, 2002, pp. 98-103.
- [7] D. Cai, P. Bidaud, V. Hayward, F. Gosselin "Design On Self-Adjusting Orthoses For Rehabilitation" Proceedings of the 14th IASTED International Conference Robotics And Applications (RA 2009), November 2-4, 2009, Cambridge, MA, USA.
- [8] K. H. Low, X. Liu , H. Yu "Development of NTU Wearable Exoskeleton System for Assistive Technologies" Proceeding of te IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, Niagara Falls, Canada - July 2005
- [9] <http://www.pandocare.com/products.html#kneeanklefoot>