

YÜK TAŞIYABİLEN PALETLİ VE İKİ AYAKLI ROBOT PROTOTİP TASARIMI

*¹Recep Kahraman, ²Alihan Omurca, ¹Osman Bahri Şerifoğlu, ³Ferhat Aldemir, ⁴Aynur Şengül,

¹Fatma Aysima Kutlu ve ¹Ersin Demir

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Türkiye

²Egevizyon Elektrik Makine A.Ş., Türkiye

³Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Türkiye

⁴Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Türkiye

Özet

Bu çalışmada engelli bireylerin istihdama kazandırılması veya ağır yük altında çalışanların, faaliyetlerini kolaylaştırmak için yük taşıyabilen bir prototip robot ayak tasarlanmıştır. Bunun için 30cm x 24cm x 6.2cm boyutlarında, 4 kg yük taşıyabilecek yük hazneli bir prototip robot tasarlandı. Prototip robotun basamaklı yüzeylerde adım atabilmesi için iki ayaklı tasarım, düz yüzeylerde daha hızlı hareket edebilmesi ve engebeli yüzeyleri daha iyi kavrayabilmesi için palet tasarımı yapılmıştır. Ayrıca haznedeki yükün rahatça boşaltılabilmesi için hazneye yük itme tasarımı da yapılmıştır. Bunun yanında prototip robotun telefon üzerinden kontrol edilebilmesi için ayrıca Android tabanlı yazılım hazırlanmıştır. Robotun statik analizleri için sonlu elemanlar metodunu esas alan ANSYS Workbench programı ve konum ve hız analizleri için ise MATLAB-Simulink programı kullanılmıştır. Yapılan çalışmadan robotun prototip imalatı gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnsansı Robot, Dengeleme, Yük Taşıma, İki ayaklı robot

Abstract

In this study, a load-bearing robot prototype foot was designed to help people with disabilities gain employment or to facilitate the activities of those who work under heavy loads. For this purpose, a 30cm x 24cm x 6.2cm robot prototype with a load chamber that can carry a load of 4 kg was designed. A two-legged design has been made so that the robot prototype can step up stepped surfaces, and a pallet design has been made so that it can move faster on flat surfaces and better grasp the uneven surfaces. In addition, a load pushing design has been made to the chamber so that the load in the chamber can be discharged easily. In addition, an Android-based software has been prepared to control the robot prototype over the phone. The ANSYS Workbench program based on the finite element method was used for the static analysis of the robot, and the MATLAB-Simulink program was used for the position and velocity analysis. The prototype production of the robot was carried out from the study.

Key Words: Humanoid robot, Balancing, Payload, Bipedal robot

1. Giriş

Üretim sahalarındaki çok farklı yüklerin bir konumdan başka bir konuma taşınması çoğunlukla bantlı konveyörler veya insan gücü ile gerçekleştirilmektedir. Ancak konveyörlerin kullanımı için üretim hattının önceden belirlenmesi ve yüksek maliyetli bir yatırımın yapılması gerekmektedir. Ayrıca üretim hattının değiştirilmesi çok yüksek maliyetli bir yatırımı gerektirmektedir. Bundan dolayı çoğu firmada yük taşıma faaliyetleri insan gücü ile gerçekleştirmektedir. Ancak yapılan araştırmalardan iş yerindeki fiziksel aktivitesi yüksek olan bireylerin erken ölüm riskinin diğer bireylere oranla %18 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [1]. Son yıllarda hayatın tüm

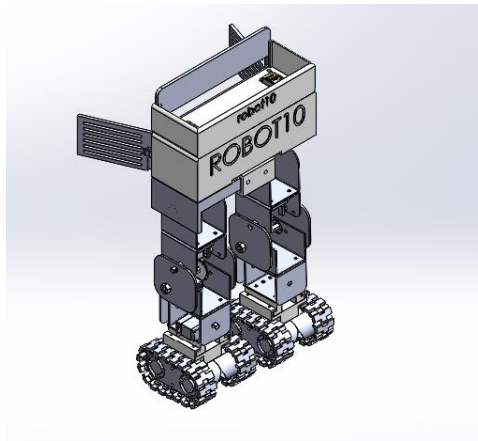
*Yazışmacı yazar: Adres: Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, 20160, Denizli, TÜRKİYE. E-posta adresi: rkahraman191@posta.pau.edu.tr.

alanlarında robot teknolojisinden faydalanılmaktadır. Bu sayede insan işgücü azaltılırken, işgücü verimliliği artırılmıştır. Yük taşıma alanında da robotlar üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur. Omron firmasının geliştirdiği tam otonom ev tipi yük taşıma robotu ile yük taşımada tek düzlemde kolaylık sağlanmıştır [2] Pelit ve ark. [3] çalışmalarında iki ayaklı yürüme mekanizmaları için yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Fu ve ark [4], boyut değişkenli hibrit sistemler için yörünge kararlılığının tanımını sunmuşlardır . Li ve ark. [5] iki ayaklı robotların enerji verimliliği üzerindeki etkilerini incelemek için bir yürüyüş modeli önermişlerdir. [5]. Yamaguchi ve Takanishi [6], robotla yürüme deneyleri yaparak, farklı tahrik edilen eklem kullanarak yarı dinamik iki ayaklı yürüyüş gerçekleştirmişlerdir. Gosvami [7], tek destek aşaması sırasında iki ayaklı robotlarda ayak rotasyonu sorununu ele almıştır. Aktas ve Medrano-Cerda [8], doğrusal kuadratik optimal kontrol teknikleri ve indirgenmiş dereceli gözlemciler kullanarak on serbestlik dereceli iki ayaklı bir robot için denge kontrolörlerin tasarımını ve geliştirilmesini ele almışlardır. Pratt ve ark. [9] fiziksel iki ayaklı yürüyen robota sanal model kontrolü uygulamışlardır. Çalışmalarında basit bir algoritma kullanarak, robotu düz yüzeyde sürekli yürümeyi başarmışlardır. Medrano-Cerda ve Eldukhri [10] sekiz serbestlik dereceli iki ayaklı bir robotun kontrol sistemi üzerine çalışmışlardır.

Bu çalışmanın amacı, engelli bireylerin yük taşıma sektöründeki istihdamlarını artırabilmek ve ağır yük taşıyan işçilerdeki sağlık sorunlarının yaşanmaması için, yük taşıma faaliyetinin kolaylaştırılmasıdır. Bu çalışma ile taşıma faaliyeti telefonla kontrol edilebilecek kadar kolaylaştırılmıştır. Ayrıca bu faaliyetinin, üretim hatlarındaki değişime kolaylıkla uyum sağlayabilmesi ve maliyetlerinin düşürülmesi hedeflenmiştir.

2. Tasarım

Yük taşıma faaliyetinin kolaylaştırılabilmesi için hem düz yüzeylerde hem de basamaklı yüzeylerde yük taşıyabilecek bir prototip robot tasarlanmıştır. Prototip aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere iki ayak grubu üzerine yerleştirilmiş bir yük taşıma haznesinden oluşmaktadır.



Şekil 1. Robot10'a ait genel görünüm

Düz yüzeylerde daha hızlı ilerleyebilmesi ve bozuk satırlı yüzeylerdeki kavrama yeteneğinin

yüksek olması için ayak kısımlarına palet yerleştirilmiştir. Tasarlanan prototip robotun adı Robot10'dur. Robot 10'a ait tasarım detayları aşağıda incelenmiştir.

2.1. Palet Tasarımı

Şekil 2'de robot prototipin ayaklarına yerleştirilen palet sistemi gösterilmiştir. Palet sisteminin tercih edilmesinin sebebi, bozuk satırlı yüzeylerde prototip robotun yüzeyi düzgün bir şekilde kavraması ve devrilme riskinin en aza indirilmesidir.

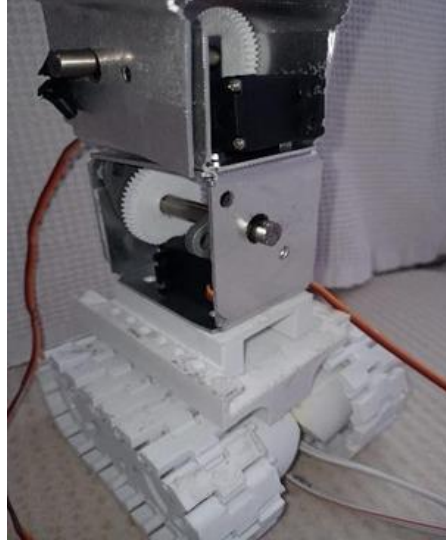


Şekil 2. Ayak paletinin genel görünümü

Paletler, 4 adet 6v 250RPM DC motoru ile tahrik edilmektedir. Motor kontrolleri, L298N motor sürücü kartı ve Arduino elektronik geliştirme kartı ile sağlanmaktadır. Kartlar ve dolayısıyla motorlar, HC-06 bluetooth modülü ile ROBOT10 adlı verilen telefon uygulamasından haberleştirilerek kullanıcı tarafından kontrol edilmektedir. Buna ilave olarak palet gövdesinin alt kısmına MPU6050 ivme sensörü bağlanmıştır. Bu sayede prototip robotun dengesi için yere paralel referans düzlemi belirlenmiştir. Böylece açı değişimlerinin algılanıp, bilek sistemi sayesinde robot prototipinin denge durumunda kalması ve referans noktasına göre robot vücudunun hareket etmesi sağlanmıştır. Palet malzemesi olarak Poliaktik asit (PLA) filament malzeme kullanılmıştır. Malzeme olarak PLA filament kullanılmasının sebebi prototip robotun genel ağırlığının hafifletilmesi ve görece dayanıklı bir malzeme kullanılmasının istenmesidir.

2.2. Bilek Tasarımı

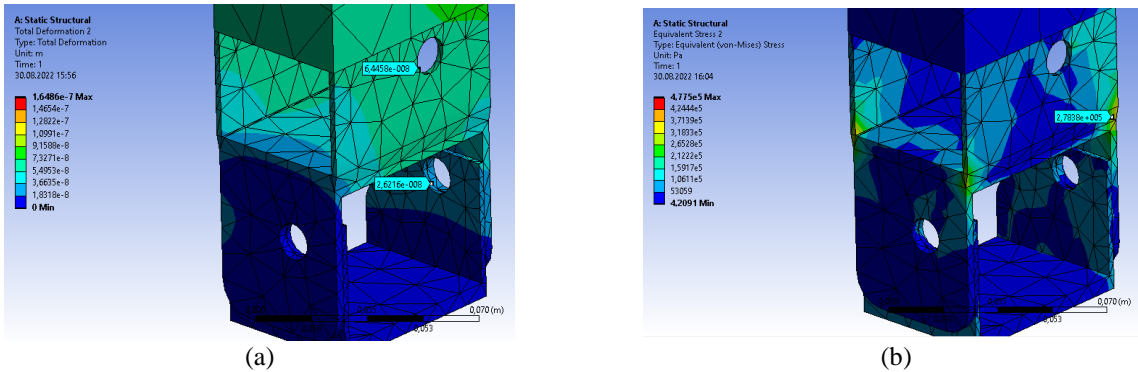
Robot prototipinin bacak ve ayak birleşim yeri olan bilek tasarımının genel görünümü Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Bilek eklemine ait üst ve alt parçaların genel görünümü

Şekil 3’de görüldüğü üzere tahrik motorları olarak 180 derecelik aralıkta dönebilen MG 995 servo motorlar kullanılmıştır. MPU 6050 ivme sensöründen alınan veriler ile çift eksenli bilek motorları kontrol edilerek robot prototipinin dengede kalması sağlanmıştır. İki parçalı bileğin biri palete sabitlenirken, diğeri ilk parçaya eş merkezli olarak bağlanmıştır. Prototip robotun yüke en fazla maruz kalan kısmı bilek eklemi olduğundan, malzemesi 1050 Alüminyum olarak tercih edilmiştir. Bilek gövdesinde oluşan gerilmelerin ve deformasyonların ölçülebilmesi için Sonlu Elemanlar tabanlı ANSYS Workbench yazılımı kullanılmıştır.

Daha önce SolidWorks çizim programında modellenen prototip robot, ANSYS Workbench analiz ortamına getirilmiştir. Robot prototipin yük haznesinin iç tabanına 4 kg’lık yayılı yük uygulanmıştır. Robot prototipin ayak tabanlarından dönme ve öteleme sınır şartları sıfır olacak şekilde sınır koşulu verilmiştir. Analiz sonucunda prototip robotun bilek bölgesinde elde edilen toplam deformasyon ve eşdeğer gerilme dağılımları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

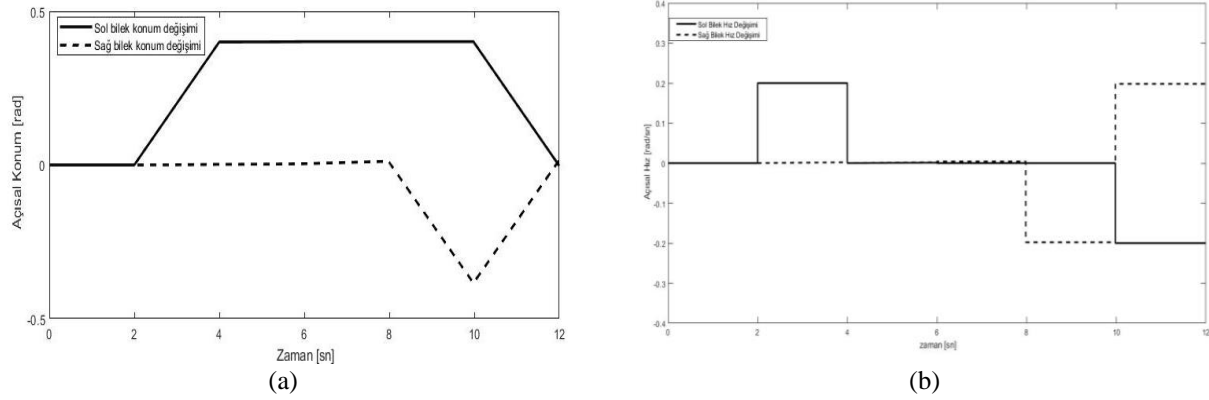


Şekil 4. Bilek eklemine ait (a) toplam deformasyon dağılımı (b) eşdeğer gerilme dağılımı

Şekil 4 (a)’da bilek eklemine ait toplam deformasyon dağılımı ve (b)’de ise eşdeğer gerilme dağılımı gösterilmiştir. Şekil 4(a)’dan görüldüğü üzere en kritik noktalar olan dışlı

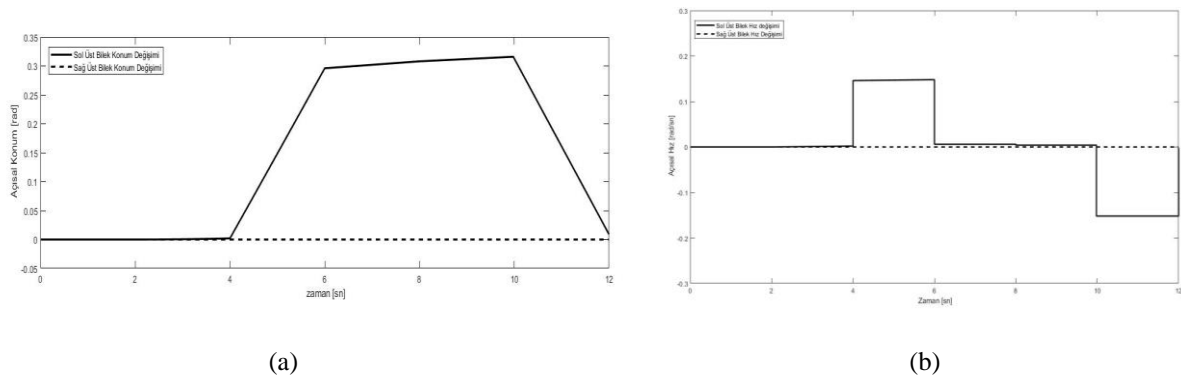
yataklamalarının yapıldığı delikler incelendiğinde toplam deformasyon değerlerinin $2,6216 \times 10^{-8}$ m ve $6,4458 \times 10^{-8}$ m olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 4 (b)'den, en kritik bölgelerin köşe noktalar olduğu görülmektedir. Bu noktalardan biri incelendiğinde, eşdeğer gerilme değerinin $2,7838 \times 10^5$ Pa olduğu görülmektedir. Deformasyon değerleri ve gerilme dağılımları incelendiğinde seçilen malzemenin yeterli olduğu görülmektedir.

Bilek ekleminin yürüme esnasındaki kinematik analizi Matlab Simulink programı kullanılarak yapılmıştır. Bunun için prototip robot yine SolidWorks programından Simulink ortamına alınmış ve motor bağlantı noktalarından tahrik verilmiştir. Yürüme hareketinin gerçekleştirilmesi için bileğin alt ve üst parçalarına uygulanan konum ve hız değişimleri aşağıda verilmiştir. Yürüme periyodu 12 saniyede tamamlanacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 5. Bileğin alt parçasının (a) konum değişimi (b) açısal hız değişimi

Şekil 5 (a) incelendiğinde sol bileğin alt parçasına 2. saniyede harekete başlayıp 2 saniyede 0,4 radyanlık açı yaptırılmıştır. Daha sonra 10. saniyede yine 2 saniye içerisinde 0 radyana geri döndürülmüştür. Bu hareketin sabit açısal hız değerleri Şekil 5 (b)'de görüldüğü üzere 0,2 rad/sn'dir. Sağ bileğin alt parçasına ise 8. saniyede ve 2 saniye içerisinde ters yönde 0,4 radyanlık bir açı yaptırılıp beklemeden 0 radyana geri döndürülmüştür. Bu hareketin açısal hızı da yine 0,2 rad/sn'dir. Şekil 6'da ise bileğin üst parçasının konum ve hız grafikleri verilmiştir.



Şekil 6. Bileğin üst parçasının (a) konum değişimi (b) açısal hız değişimi

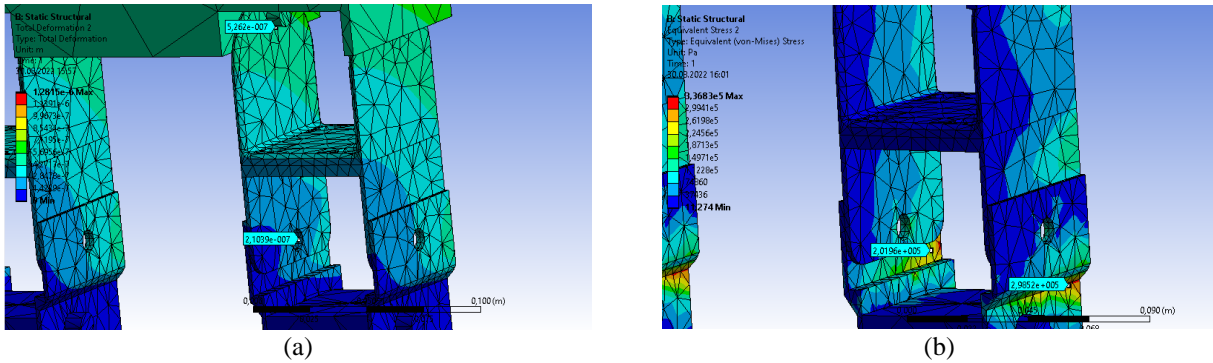
Şekil 6 (a)'da bileğin sol üst parçasının 4. ve 6. saniyeler arasında 0,3 radyan döndürüldüğü, daha sonra 10. saniyeye kadar denge kaybını önlemek için 0,01 radyalık bir değişimden sonra başlangıç konumuna döndürüldüğü görülmektedir. Bu hareketin 4. ve 6. saniyeler arındakini ve geri hareketini 0,15 rad/sn açısal hızla 6. ve 10. saniyeler arındakini ise sıfıra yakın bir hızla gerçekleştirmiştir. Sol üst parça hareketini tamamlarken sağ üst parça hareketsiz bırakılmıştır.

2.3. Diz-Kalça Tasarımı



Şekil 7. Diz ve kalça eklemlerinin genel görünümü

Şekil 7'de görüldüğü gibi bilek kısmının ana gövdeye bağlanan ara bölmesi, diz ve kalça eklemlerinden oluşmaktadır. Diz ve kalça eklemleri birbiriyle uyumlu bir şekilde çalıştırılarak prototip robotun insan yürüyüşüne uygun hareket etmesi sağlanır. Bu eklemlerde de yine MG 955 servo motorlar kullanılmıştır. Diz ve kalça eklemlerinde oluşan toplam deformasyon ve eşdeğer gerilme analizleri de ANSYS Workbench ile yapılmıştır.

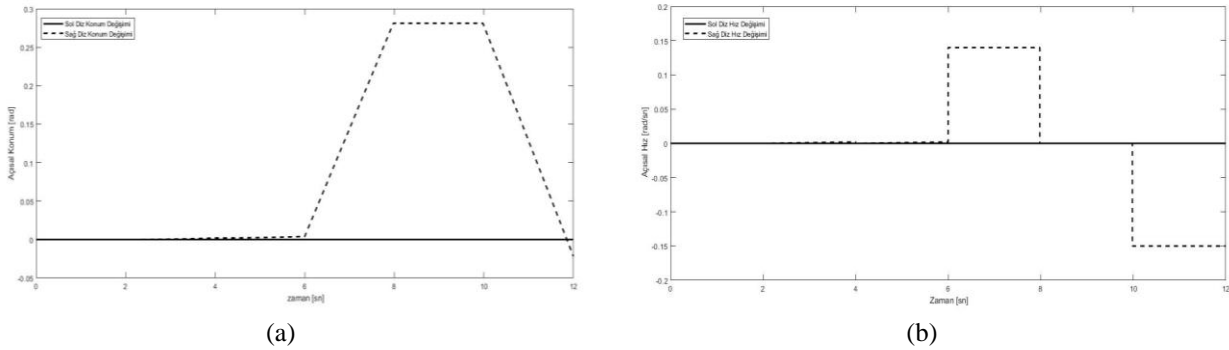


Şekil 8. Diz ve kalça eklemlerindeki (a) toplam deformasyon dağılımı (b) eşdeğer gerilme dağılımı

Şekil 8 (a)'da diz ve kalça eklemlerindeki toplam deformasyon dağılımı ve (b)'de ise eşdeğer

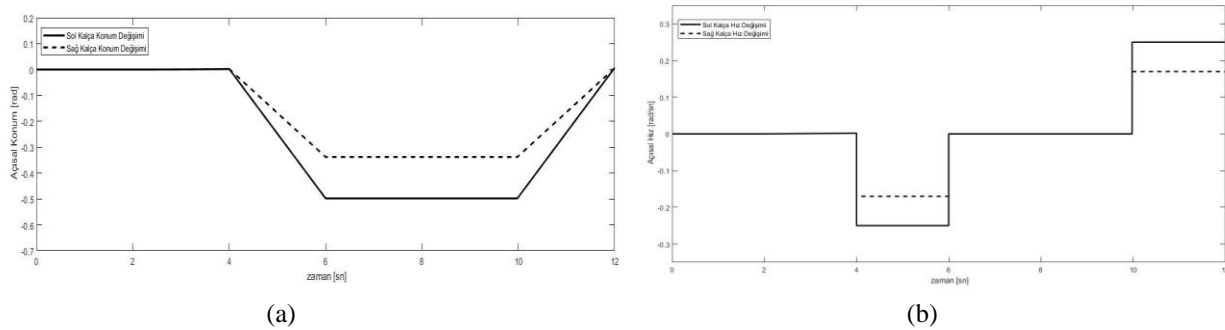
gerilme dağılımı gösterilmiştir. Şekil 8(a)'dan görüldüğü üzere yine dişli yataklamalarının yapıldığı delikler incelendiğinde toplam deformasyon değerlerinin $5,262 \times 10^{-7}$ m ve $2,1039 \times 10^{-7}$ m olduğu görülmektedir. Şekil 8 (b) incelendiğinde ise, en kritik bölgelerin alt arka köşe noktalar olduğu görülmektedir. Bu noktalar incelendiğinde eşdeğer gerilme değerinin $2,0196 \times 10^5$ Pa ve $2,9852 \times 10^5$ Pa olduğu görülmektedir. Bu bölgede en yüksek gerilmenin $3,3683 \times 10^5$ Pa olduğu görülmektedir. Deformasyon değerleri ve gerilme dağılımları incelendiğinde tasarımın yeterli olduğu görülmektedir.

Diz ve kalça eklemlerinin yürüme esnasındaki kinematik analizi de Matlab Simulink programı kullanılarak yapılmıştır. SolidWorks'te tasarlanan robot prototip, Simulink ortamına alınarak motor bağlantı noktalarından tahrik verilmiştir. Yürüme hareketinin gerçekleşebilmesi için diz ve kalça eklemlerine uygulanan konum ve hız değişimleri aşağıda verilmiştir. Yürüme periyodu yine 12 saniyede tamamlanacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 9. Diz eklemindeki (a) konum değişimi (b) açısal hız değişimi

Şekil 9 (a) incelendiğinde sağ diz eklemine 6. ve 8. saniyeler arasında 0,27 radyanlık açı yaptırılmıştır. Daha sonra 2 saniye sabit bırakılıp tekrar 2 saniye içerisinde geri döndürülmüştür. İleri ve geri hareketin açısal hızı Şekil 9 (b)'de görüldüğü üzere sabit 0,15 rad/sn'dir. Sol diz konumunda ise herhangi bir değişim yapılmamıştır. Şekil 10'da kalça eklemine konum ve hız grafikleri verilmiştir.

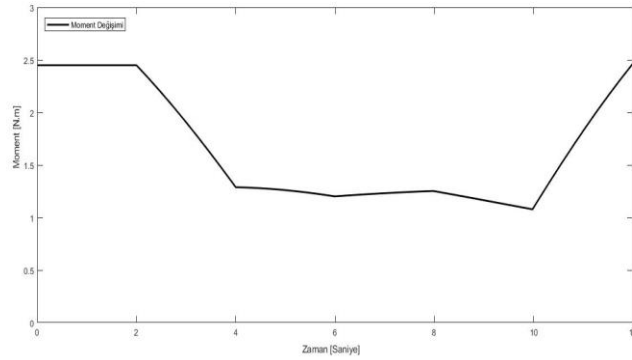


Şekil 10. Kalça eklemine (a) konum değişimi (b) açısal hız değişimi

Şekil 10 (a)'da sağ ve sol kalça eklemlerinin 4. ve 6. saniyeler arasında negatif yönde sırasıyla 0,33 ve 0,5 radyan döndürülmüştür. Sol kalça eklemi 0,23 rad/s açısal hızla dönerken sağ kalça eklemi 0,17 rad/s açısal hızla dönmektedir. 6. ve 10. saniyeler arasında eklemler durmakta daha sonra eklemler aynı açısal hızlarla tersi yönde dönmektedir.

2.4. Motor Seçimi

Tasarlanan robot prototipinin eklemlerinin tamamında MG995 Servo motor kullanılmıştır. Seçilen bu motor, endüstriyel olamayan servo motorların içerisinde kontrolünün kolay olması ve görece verdiği torkun yüksek olması sebebiyle yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Motor, 1 Nm'lik moment üretmektedir. Prototip robotun tüm eklemleri hesaba katıldığında en çok zorlanan ekleminin, bilek eklemi olduğu anlaşılmaktadır. Matlab Simulink programında prototip robot üzerine etki eden yüklemeler verilip adımlama hareketi yaptırıldığında, bilek ekleminde ihtiyaç duyulan moment gereksinimi dağılımı Şekil 11'de gösterilmiştir.

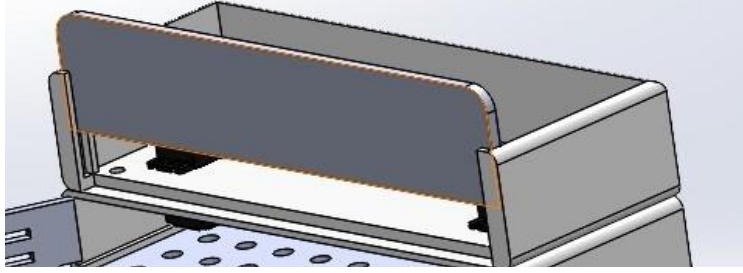


Şekil 11. Adımlama periyodunda bilek ekleminde ihtiyaç duyulan moment gereksinimi dağılımı

Şekilden görüldüğü üzere 0 ve 2. Saniyeler arasında 2,5 Nm'lik momente ihtiyaç duyulmaktadır. Prototip robotun adımlama esnasında ayağın 9 cm yüksekliğe çıkması gerekmektedir. Bu değere çıkabilmesi için bilek eklemine 0,34 rad'lık bir dönme açısı, yukarı adımlama için gereklidir. Bu değer üzerine çıkılarak düz dişli sistemi ile motorun eklemeye verdiği tork 4 kat artırılmıştır. Böylece 4 Nm'lik bir moment elde edilmiştir.

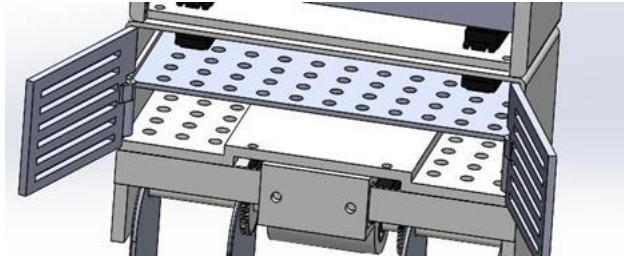
2.5. Yük Taşıma Haznesi

Şekil 12'de ana gövdeye 4 adet cıvata ile sabitlenmiş yük taşıma haznesi gösterilmiştir.



Şekil 12. Yük Taşıma Haznesi

Haznedeki yükün el değmeden kolaylıkla dışarı doğru itilebilmesi için yine iki adet servo motor kullanılmıştır. Yük boşaltıldıktan sonra kızaklı kapak kapatılmaktadır.

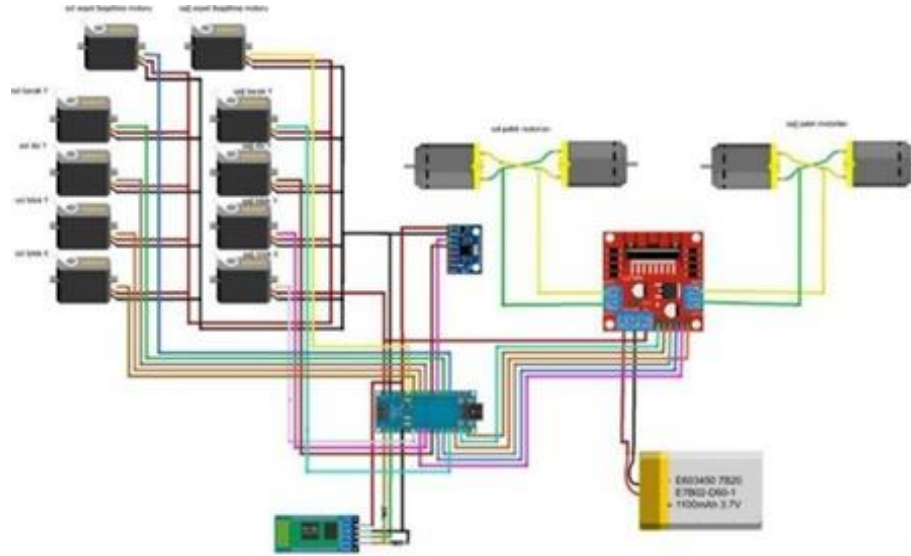


Şekil 13. Elektronik Devre Tertibat Haznesi

Şekil 13’de elektronik devre tertibatı haznesi gösterilmiştir. Bu gölüm yük haznesi ile ana gövde arasında yer almaktadır. Delikli rafla bu bölge ikiye bölünmüş böylece kartların ve kablolama bölümlerinin ayrılması sağlanmıştır. Bu bölümün önüne menteşeli kapaklar ilave edilmiştir. Bu kısmın boyutları 236x68x92 mm’dir.

2.6 Elektronik Devre Tasarımı

Robot10 projesinin motor kontrollerini sağlayan elektronik devre şeması aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 14. Elektronik Devre Şeması

Devre şemasında yan yana gösterilen 8 servo motor eklemlerin kontrollerinde, bu 8 servo motorların üzerindeki 2 servo motor yük haznesinin boşaltılmasında kullanılmaktadır. Sağ üstteki 4 DC motor, paletleri tahrik etmektedir. DC motorların arasında altta duran kart, L298N motor sürücü kartıdır ve kartın hemen altında görülen pilden enerjisini almaktadır. Sürücü kart ile pil arasında sol yandaki kart, Arduino Nano elektronik geliştirme kartıdır. Bu kart robot kontrol yazılımının gömüldüğü karttır. Bu kartın üzerindeki ve altındaki kartlar, MPU 6050 ivme ölçer sensörü ve HC06 bluetooth sensörüdür.

2.7 Dengeleme Sistemi

Prototip robotun devrilmemesi için kullanılan dengeleme sistemi MPU 6050 ivme sensörü ile gerçekleştirilmektedir. Sensör, paletin bağlı olduğu gövdenin hemen altına yerleştirilmiştir. Bu sayede prototip robotun eğimli yüzeylerden çıkarken referans yatay düzleme göre açı farkı tespit edilebilmektedir. Bu sayede tersi yönde hareket sağlanıp düşmenin önüne geçilmiştir. Benzer durum ileri, geri, sağa ve sola yatma durumları göz önüne alınıp 3eksende kontrol sağlanmıştır.

3. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, engelli bireylerin yük taşıma iş sektöründe istihdam edilebilmesi ve ağır yük altında çalışan bireylerin yük taşıma faaliyetinden kaynaklanan sağlık sorunlarının yaşanmaması için yük taşıma faaliyetinin kolaylaştırması hedeflenmiştir. Bunun için yük taşıma haznesi bulunan, paletli mekanizma ile ilerleyebilen ve basamaklı yüzeylere çıkabilecek kabiliyete sahip, ayakları bulunan bir robot prototipi tasarlanmıştır.

ANSYS Workbench programı ile yapılan gerilme ve deformasyon analizi sonucunda seçilen malzemelerin yeterli dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Yapılan analiz ile prototip robotun bilekten, 20 derecelik büküm hareketinin sağlanabildiği görülmüştür. Yaygın bir şekilde kullanılan MG 955 servo motorları eklem motorları olarak kullanılmıştır. Ancak yapılan analizde

bu motorun ürettiği tork yeterli gelmediğinden, 4:1 çevrim oranıyla dişli tasarımı yapılarak motorun aktardığı moment dört katına çıkarılarak yeterli hale getirilmiştir. Yapılan tasarım neticesinde toplam boya sahip prototip robotun ayağı 9,5 cm kaldıracıdır. Tasarlanan prototip robotun eğimli, bozuk satırlı ve basamaklı yüzeylerde yürürken düşmemesi için ivme sensöründen elde edilen açı değerlerinin kullanılması ile kontrolü sağlanmıştır.

4. Teşekkür

Bu çalışmada adı geçen yazarlar ile Doç. Dr. Ersin Demir'in danışmanlığında ve Recep Kahraman'ın takım kaptanlığında Teknofest 2022 İnsanlık Yararına Teknoloji/Sosyal İnovasyon Kategorisinden yarışmaya katılmış ve bu yarışmalarda final aşamasına kalınarak yarışma tamamlanmıştır. Projede malzeme ve üretim sürecinde destek sağlayan Abaloğlu Yem Sanayi A.Ş ve Springday (Ege Vizyon Elektrik Makine A.Ş.) firmalarına teşekkür ederiz.

5. Referanslar

- [1] Coenen P, Huysmans MA, Holtermann A, Krause N, Mechelen W, Straker L, Van der Beek A. Do highly physically active workers die early? A systematic review with meta-analysis of data from 193 696 participants. *British J. Sports Med. Phys.* 2018;52:1320-1326.
- [2] https://industrial.omron.com.tr/tr/misc/dm/autonomous-mobile-robots?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=otonom_robotlar (14.10.2022)
- [3] Pelit MM, Chang J, Takano R , Yamakita M. Bipedal Walking Based on Improved Spring Loaded Inverted Pendulum Model with Swing Leg (SLIP- SL). 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) 2020;10.1109:72-77. Doi:10.1109/AIM43001.2020.9158883.
- [4] Fu C, Shuai M, Chen K. Proving Asymptotic Stability of Dynamic Walking for a Five-Link Biped Robot with Feet. 2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics 2006;1 – 6 Doi:10.1109. 10.1109/RAMECH.2006.252618.
- [5] Li L, Xie Z, Luo X, Li J. Effects of Torso Pitch Motion on Energy Efficiency of Biped Robot Walking. *Appl. Sci.* 2021;11.2342.
- [6] Yamaguchi J, Takanishi A. Development of a leg part of a humanoid robot - Design of a biped walking robot having antagonistic driven joints using a nonlinear spring mechanism. *Adv. Robot.* 1996;11:633-652.
- [7] Goswami, A. Foot Rotation Indicator (FRI) Point: A New Gait Planning Tool to Evaluate Postural Stability of Biped Robots. *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation.* 1999;47-52 Doi:[10.1109/ROBOT.2000.845226](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.845226).

- [8] Akdas, D., ve Medrano-Cerda, GA. Design of a Stabilizing Controller for a 10-degree of Freedom Bipedal Robot Using Linear Quadratic Regulator Theory, Proc. Inst. Mech. Eng. C: J. Mech. Eng. Sci., 2000;215:27-43.
- [9] Pratt, J., Dilworth, P. ve Pratt, G. Virtual Model Control of a Bipedal Walking Robot, Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, April 1997;02139:193-198.
- [10] Medrano-Cerda, GA. and Eldukhri, EE. Biped robot locomotion in the sagittal plane. Trans. Inst. Measmt and Control, 1997; 38- 49. Doi [10.1177/014233129701900104](https://doi.org/10.1177/014233129701900104)