



Dış iskelet Robot Eklemleri için Antagonistlik ve Öngerilmeli Tip Sertliği Değiştirilebilir Eyleyici Tasarımlarında Güç Gereksinimi ve Enerji Sarfıyatı Karşılaştırması

Hasbi KIZILHAN, Özgür BAŞER*, Ergin KILIÇ, Necati ULUSOY

Süleyman Demirel Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

(Alınış Tarihi: 12.09.2014, Kabul Tarihi: 27.11.2014)

Anahtar Kelimeler

Dış iskelet robot
Ortez
Protez
Sertliği değiştirilebilir
Eyleyici
Antagonistlik tip tasarım
Ön gerilmeli tip tasarım

Özet: Dış iskelet robotlar, insan uzuvları ile etkileşim halinde çalışan, giyilebilir elektromekanik yapılardır. Bu robotlar, yürüme engeli olan ya da yaşlı kişilerde yardımcı uzuv, felçli kişilerde rehabilitasyon ve sağlıklı insanlarda güç artırımı amacı ile kullanılmaktadır. Dış iskelet robotların tasarımının ve denetiminin insan vücudunun biyomekanik işleyişi ve sinir-kas denetimi ile benzer olması bu robotların performansını en üst seviyelere çıkaracaktır. İnsan vücudunun sinir-kas sistemi, bağlı buldukları eklemlerde sertliği devamlı değiştirerek minimum enerji sarfıyatı ile esnek ve güvenli bir hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Günümüzde sertliği değiştirilebilir eyleyici tasarımları ile ilgili çalışmalar hızla devam etmektedir. Bu tasarımlardan önde gelenleri antagonistik ve öngerilmeli eyleyici tasarımlarıdır. Dış iskelet robotlar, batarya gibi ekipmanlar ile çalışan mobil sistemler olduğu için enerji verimli olmalı ve tasarımda kullanılacak olan motorlardan istenen güç gereksinimlerinin minimum düzeyde tutulması gerekmektedir. Bu çalışmada; optimum yürüme hızında ayak bileği için antagonistik ve öngerilmeli sertliği değiştirilebilir eyleyici tasarımları minimum güç gereksinimi ve enerji sarfıyatı açısından karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlar; değişken sertlik katsayısı koşulunda antagonistik eyleyici tasarımının öngerilmeli sertliği değiştirilebilir eyleyici tasarımdan daha enerji verimli olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, antagonistik sertliği değiştirilebilir eyleyici tasarımlarının, dış iskelet robotların, ortezlerin, protezlerin ve insansı robotların eklemlerinde kullanımı düşük enerji sarfıyatı elde etmek için antagonistik tasarımlardan daha uygundur.

Power Requirement and Energy Consumption Comparison of Antagonistic and Pretension Type Variable Stiffness Actuator Designs for the Joints of Lower Extremity Exoskeleton Robots

Keywords

Exoskeleton robot
Orthesis
Prosthesis
Variable stiffness actuator
Antagonistic type design
Pretension type design

Abstract: Exoskeleton robots are wearable electromechanical structures which can work interacting with human limbs. These robots are used as assistive limbs, rehabilitation and power augmentation purposes for elderly or paralyzed persons and healthy persons respectively. The similarity of the design and control between the exoskeleton robots and human body maximizes the device performance. Human body neuro-muscular system varies the stiffness of the human joints regularly and thus provides flexible and safe movement capability with minimum energy consumption. The studies on the variable stiffness actuator designs are still moving along rapidly in the present time. The leading ones are antagonistic and pretension type variable stiffness actuators. Exoskeleton robots need to be driven energy efficiently and with less power requirements as they are mobile devices supplied by batteries. In this study, antagonistic and pretension type variable stiffness actuator designs of ankle joint are compared in terms of energy efficiency and power requirement for

optimal (medium) walking speed. The comparisons are conducted in the case of variable stiffness in a gait cycle. The results show that the antagonistic type actuator design is more efficient and requires less power than the pretension type designs for variable stiffness gait cycles. As a conclusion, antagonistic type designs are more feasible than pretension type designs for the joints of exoskeleton robots, orthoses, prostheses and humanoid robots.

1. Giriş

Dış iskelet robotlar insan vücudu ile uyumlu olarak çalışabilen, enerji verimliliğine sahip, güvenli, kararlı ve giyilebilir elektromekanik elemanlardır. Bu robotlar, yürüme engeli bulunan hasta yada yaşlı kişilerde rehabilitasyon ve askeri uygulamalarda güç arttırma amacıyla kullanılmaktadır. Tasarlanan dış iskelet robotlar kullanıldığı alanlarda kişilerin hayatlarını kolaylaştırmakta ve daha iyi bir yaşam kalitesi sunmaktadırlar.

İnsan kas-iskelet sistemi, bağlı bulunduğu eklemlerde sertliği ve sönümü değiştirerek minimum enerji ile esnek ve kararlı bir hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Günümüzde gelişen robot teknolojileri ile birlikte sertliği değiştirilebilir eyleyici tasarımlarının kullanıldığı dış iskelet robotlar üzerine çalışmalar hızla devam etmektedir. Dış iskelet robotlar, kullanıcı ile sürekli uyum halinde çalışması gerektiği ve mobil olarak kullanıldığı için bu robotlarda kullanılan eyleyiciler enerji sarfiyatı açısından verimli olmaları istenmektedir. Kullanıcı ile uyumu en üst seviyelerde tutmak ve biyomimetik bir hareket kabiliyeti sağlayabilmek için, elektrik motoru, hidrolik eyleyici gibi sert eyleyicilerin dış iskelet robot tasarımlarında kullanımı uygun değildir. Bunun yerine alternatif olarak sertliği değiştirilebilir yumuşak eyleyicilerin kullanılması bu robotlardan istenen özelliklerin elde edilmesinde büyük öneme sahiptir.

Sertliği değiştirilebilir eyleyicilerin, ani şok yükleri veya darbeleri minimize edebilmesi, kullanıcıyla uyumlu bir şekilde çalışma ve kullanılan elastik eleman sayesinde enerji depolama ve depoladığı enerjini geri verebilme gibi özelliklerinden dolayı dış iskelet robotlarında kullanımı giderek artmaktadır. Bu nedenle insanlarla etkileşim halinde bulunan robotlarda ve insansı robotlarda daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Daha küçük boyutlarda, daha enerji verimli, daha hafif ve insanlarla birlikte kullanıma daha uyumlu eyleyici tasarımları için çalışmalar günümüzde halen devam etmektedir. Bu sertliği değiştirilebilir eyleyicilerden istenen özellikler şu şekilde özetlenebilir:

- Eyleyicinin denge konumunda enerji tüketimi olmaksızın sertlik değiştirilebilmelidir. Literatürde var olan AwAS-I (Jafarivd., 2010) ve AwAS-II (Jafari vd., 2011) tasarımlarında sertlik enerji harcanmadan ayarlanabilmektedir. Ancak, sistemde var olan sürtünmelerin ve ataletlerin

üstesinden gelebilmek için minimum düzeyde bir enerji sarfiyatı kaçınılmazdır.

- Denge konumu dışında sertliğin ayarlanması sırasında harcanan enerji elastik elemanlar tarafından depolanmalı ve bu depolanan enerjinin tamamı eyleyicinin çıkışı tarafından yapılan işe kayıpsız olarak dönüştürülebilmelidir.
- Sertliği istenilen bir değerde sabit tutabilmek için herhangi bir enerji harcanmamalıdır. MESTRAN (Quy vd., 2011) tasarımında enerji girişi olmadan sertlik sabit tutulabilmektedir.
- Sertlik dış yükten bağımsız olmalıdır. Yani eyleyicinin çıkışına dışarıdan uygulanacak olan bir kuvvet eyleyicinin sertliğini değiştirmemelidir.
- Sertlik değişim oranı mümkün olduğu kadar geniş tutulmalıdır. AwAS-II tasarımında sertlik oranı sıfır ile sonsuz arasında değişmektedir. Ayrıca bu eyleyici çok daha büyük hareket oranına, çok daha geniş sertlik oranına ve çok daha kısa sürede sertlik seviyesini ayarlayabilme kabiliyetine sahiptir.
- Sertlik ayarlama mekanizması eyleyicinin ataletini yüksek oranda arttırmamalıdır.
- Eyleyiciler maksimum enerji depolama kapasitesine sahip olmalıdır.

Sertliği değiştirilebilir eyleyici tasarımlarının uyumlu ve enerji verimli olması için bazı önemli kriterler vardır. Bu önemli kriterleri şu şekilde özetleyebiliriz:

- Tasarlanan eyleyicinin mümkün olduğunca kompakt ve hafif olması gerekir. VSA-Cubebot (Catalona vd., 2011) gibi tasarımlar oldukça hafif ve kompakt tasarımlardır. Bu eyleyicilerin hafif olması enerji tüketiminin daha az olmasını, kolay taşınabilmesini ve insansı robotlarda kullanım kolaylığı sağlamaktadır.
- Eyleyici bağlantısı geniş çalışma aralığına sahip olmalıdır. Örneğin; (APVSEA) aktif-pasif sertliği değiştirilebilir elastik eyleyici tasarımında en düşük sertlikte 100° hareket oranına sahipken en yüksek sertlikte ise 10° hareket oranına sahiptir. Hareket oranının fazla olması farklı alanlarda bu eyleyicilerin kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Wang vd., 2010)
- Eyleyicilerden beklenen diğer bir özellik ise sertliğin hızlı bir şekilde değiştirilebilmesidir. Bu özellik alt uzuv dış iskelet robotlar gibi uygulamalarda büyük öneme sahiptir. Çünkü bu dış iskelet robotları kullanıcı ile uyumlu bir

şekilde çalışması beklenmektedir. Dış iskelet robotlar insan vücuduyla sürekli etkileşim halinde çalıştıkları için bu robotlarla insan vücudunun kas ve iskelet sistemi arasındaki uyumun en üst noktaya çıkarılması gerekir. Tasarlanan dış iskelet robotlar insan vücudu ile sürekli uyum halinde çalışması istendiğinden bu robotlarında mümkün olan en yüksek hızda sertliği değiştirebilmesi gerekmektedir. Sertliği hızlı bir şekilde değiştirme dış iskelet robotların insan uzuvlarına benzer biyomimetik bir hareket kabiliyeti kazandıracaktır.

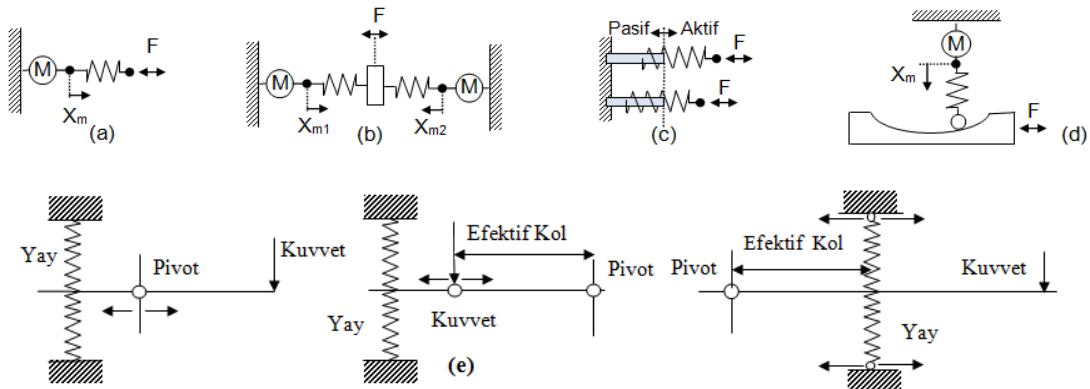
- Tasarlanan eyleyicilerden mümkün olduğunca düşük güç tüketimine sahip olmaları beklenir. Eyleyici tasarımlarında enerji tüketimi olmaksızın sertliğin ayarlanması ve sertliğin belli bir değerde tutulması içinde herhangi bir güç harcanmaması istenmektedir. Bu da eyleyicilerin dış iskelet robotlarda küçük bataryalar ile birlikte çalışmasına olanak verecektir.
- Eyleyicilerin pozisyon ve sertlik kontrolü bağımsız bir şekilde yapılabilirdir. Örneğin AMASC (Hurst vd., 2004) gibi tasarımlarda sertlik ve pozisyon bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Bu bağımsızlık, kontrolü daha kolay yapar ve ayrıca denge pozisyonunu daha hızlı bir şekilde ayarlanırken sertliğin daha yavaş ayarlanmak istendiği durumlar için motorların ayrı ayrı kontrol edilmesine izin verir.

Makalenin devamında, ilk olarak literatürde var olan sertliği değiştirilebilir eyleyicilerin sınıflandırılması yapılmıştır. Daha sonra optimum (ortalama) bir hızda ayak bileği için antagonistlik ve öngerilmeli sertliği

değiştirilebilir eyleyici tasarımların minimum enerji sarfiyatı ve minimum güç gereksinimi açısından karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırma tam bir yürüme döngüsü sırasında sertliğin sürekli değiştirdiği koşulda yapılmıştır ve elde edilen veriler sonuç kısmında tartışılmıştır.

2. Sertliği Değiştirilebilir Eyleyici Tasarımları

Sertliği değiştirilebilir eyleyiciler (diğer adıyla yumuşak eyleyiciler) tasarımlarındaki pasif elastik elemanlar ile enerji depolama/bırakma, güvenli etkileşim sağlama ve ani vurma sonucu oluşan yüksek kuvvetlerin etkisini en aza indirme gibi önemli avantajlara sahiptir (Alexandre, 1990). Bu nedenle, insanlarla etkileşim halinde çalışan robotlarda ve insansı robotlarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde daha fazla enerji verimli, daha küçük boyutlarda, daha hafif yeni eyleyici tasarımları üzerine çalışmalar derinlemesine devam etmektedir. Bu eyleyiciler günümüzdeki gelişme durumuna bakıldığında beş başlık altında gruplandırılabilir. Bunlar, denge konumu ile düzenlenen eyleyiciler (equilibrium controlled actuators), antagonistlik etkileşim ile düzenlenen eyleyiciler (antagonistic controlled actuators), yapısal değişiklik ile düzenlenen eyleyiciler (structure controlled actuators) ve mekanik olarak düzenlenen eyleyicilerdir (mechanically controlled) (Van Ham, 2009). Bunlardan farklı olarak iletim oranı değiştirilerek sertliğin ayarlanabildiği eyleyiciler de bulunmaktadır (Variable transmission actuators) (Vanderborgh, 2012). Şekil 1'de bu eyleyicilere ait şematik gösterimler verilmektedir.



Şekil 1. Sertliği değiştirilebilir eyleyici tiplerinin şematik görünüşleri: (a) denge konumu ile düzenlenen eyleyici, (b) antagonistlik etkileşim ile düzenlenen eyleyici, (c) yapısal değişiklik ile düzenlenen eyleyici, (d) mekanik olarak düzenlenen eyleyici (e) iletim oranı ile düzenlenen eyleyiciler

2.1. Denge Konumu ile Düzenlenen Eyleyiciler

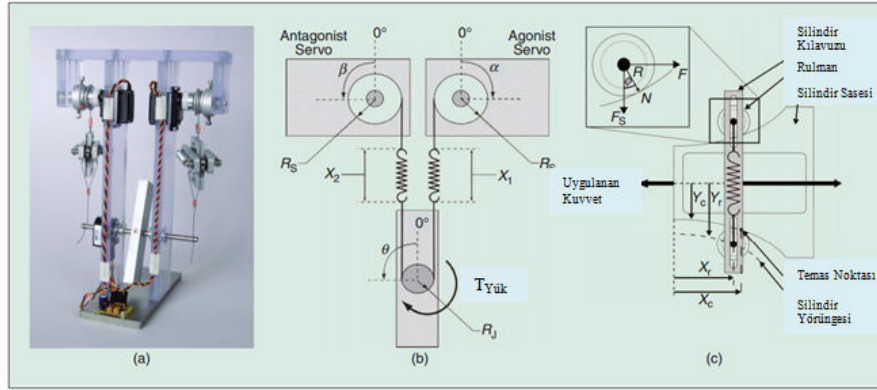
Denge konumu ile düzenlenen eyleyiciler lineer bir yaya seri olarak bağlanmış elektrik veya hidrolik motoru gibi sert bir eyleyici ile yayların denge konumunu düzenleyerek çıkış kuvvetini ayarlarlar. Kullanıldığı uygulamada, çıkış kuvveti

ayarlanabilirken sertlik sabittir. Bu tür eyleyiciler literatürde seri elastik eyleyiciler (Series Elastic Actuator) olarak bilinmekte ve en büyük avantajı ise tasarımlarının basit olmasıdır (Pratt, 1995).

2.2. Antagonistlik Etkileşim ile Düzenlenen Eyleyiciler

Antagonistlik etkileşim ile düzenlenen eyleyiciler iki elektrik motoru ile hareketlendirilen lineer olmayan iki yayın karşılıklı yerleştirilmesiyle oluşturulan tasarımlardır. Bu tasarım ile insan vücudunun eklemlerindeki kasların antagonistlik dizilimi taklit edilmektedir. Bu antagonistlik tasarımın en bilinen örneklerinden biri insan kolunda bulunan kol kaslarıdır. Kol kaslarından biri kasılırken diğeri uzadığında kol uzar ya da bükülür. Bu dizilimde motorların pozisyonları denetlenerek eyleyicinin

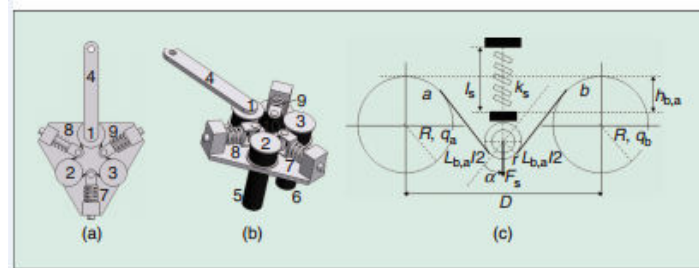
sertliği ve bu sertliğin denge konumu ayarlanmaktadır. Migliore ve arkadaşları iki non-lineer yayı kullanarak antagonist düzene bağlı bir tasarım ortaya koymuşlardır. Şekil 2’de gösterildiği gibi, biyolojik olarak esinlenen bu tasarımda sertlik kontrolü, iki farklı seri elastik eyleyicinin dönel bir bağlantıyı karşılıklı olarak tahrik etmesi ile sağlanmaktadır. Motorlar aynı yönde döndüğünde, bağlantının denge pozisyonu değişir. Motorlar zıt yönde döndüğü zaman ise, bağlantı sertliği değiştirilebilmektedir (Migliore vd., 2005).



Şekil 2. (a) Antagonistlik tip eyleyici, (b) İki seri elastik eyleyicinin antagonistlik düzenlemesinin şematik çizimi, (c) İkinci dereceden bir yay konfigürasyonu şeması (Migliore vd., 2005)

Bir antagonistlik tasarım “tek yönlü”, “çapraz bağlama” ve “çift yönlü” antagonist düzenlemelere sahiptir. Şekil 3’te gösterilen sertliği değiştirilebilir eyleyici (VSA) çapraz bağlamalı konfigürasyonla düzenlenen antagonistlik eyleyici örneklerinden biridir. Yaylarla gerilen ve kayışla birbirine bağlı üç makaraya sahip olan bu eyleyici, bağlantı sertliği değişken ve kontrol edilebilen kompakt dönel bir eyleyicidir. Bu tasarım Şekil 3’te 1,2 ve3 ile numaralandırılmış üç adet makaraya sahiptir. 2 ve 3 numaralı makara DC motorla kontrol edilmektedir. Diğer makara ise çıkış koluna bağlıdır. Makaralar

arasına yerleştirilen kayış üzerine üç farklı gerdirme mekanizması(7,8 ve 9) yerleştirilmiştir. 8 ve 9 numaralı gerdirme mekanizmaları non-lineer yayları düzenlemektedir. Diğer 7 numaralı mekanizması ise sadece diğer iki makaraya karşı aradaki kayışı tutmak için kullanılan bir gerdirme mekanizmasıdır. Bu eyleyiciyi daha sert yapmak için, motor 5 ile makara 2 saat yönünün tersine ve motor 6 ile makara 3 saat yönünde döndürülmelidir. Makara 2 ve 3 aynı yönde döndüğü zaman, yayın boyu değişmez ve sertlik aynı kalır fakat denge pozisyonu değişecektir.



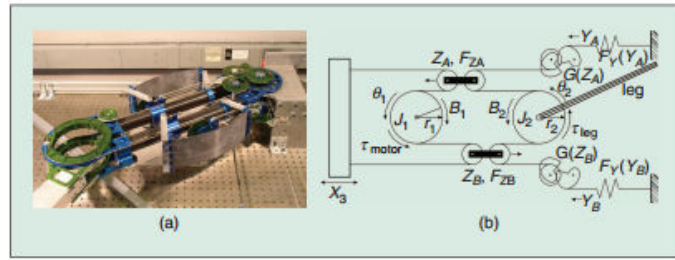
Şekil 3.Çapraz bağlı antagonistlik tasarımın CAD tasarımı (a, b)ve tasarımındaki non-lineer yaylar için kullanılan mekanizma (Tonietti vd., 2005)

Bu tasarım daha kompakt olması, hızlı ve devamlı bir şekilde sertliği değiştirebilmesi gibi avantajlara sahiptir. Ancak non-lineerlik daha karmaşık olduğundan bu eyleyicinin kontrolü daha

karmaşıktır. Bu eyleyicinin daha gelişmiş bir versiyonu olan VSA-II tasarımı bu prensibe göre tasarlanmıştır. Bu tasarım daha kompakt olmasının yanında tork kapasitesi daha fazladır ve robotik kol

uygulamaları için daha uygundur. Hem dengeyi hem de sertliği değiştirmek için motorların aynı anda çalıştırılmaya ihtiyaç duyulması antagonist motor kullanımının ön önemli dezavantajıdır. Ancak bu düzenlemede, sertlik ve denge kontrolünü ayrı olarak yapabilmek için motorlar istenildiği şekilde düzenlenebilir (Tonietti vd., 2005). Bu prensibe bağlı olarak tasarlanan örneklerden biri Hurst ve arkadaşları tarafından geliştirilen AMASC tasarımıdır. AMASC tasarımını şematik resmi Şekil 4'de gösterilmiştir. Bu tasarım iki adet motora sahiptir. Bu motorlardan biri ön gerilmeyi değiştirerek sertliği ayarlarken, diğeri yayın denge pozisyonunu kontrol

eder. Bu tasarım diz bağlantısına benzemektedir. Şekil 4'de görüldüğü gibi antagonist kaslara benzer iki zıt yay vardır. Motor tarafından değiştirilen ön gerilme her iki yayı da uzatır. Diğer motor ise yay pozisyonunu ayarlar. Bu eyleyicide sertlik ve denge pozisyonu bağımsız olarak kontrol edilebilir. Bağımsız olarak kontrol edilebilmesi, bu eyleyicinin kontrolünü daha kolay yapar ve denge pozisyonunu daha hızlı değiştirirken sertliği daha yavaş değiştirme gibi özel uygulamalar için ayrı ayrı motor tasarımına izin verir. Bu eyleyicinin dezavantajı kullanılan kablo ve makaralar nedeniyle oldukça karmaşık olmasıdır (Hurst vd., 2004).

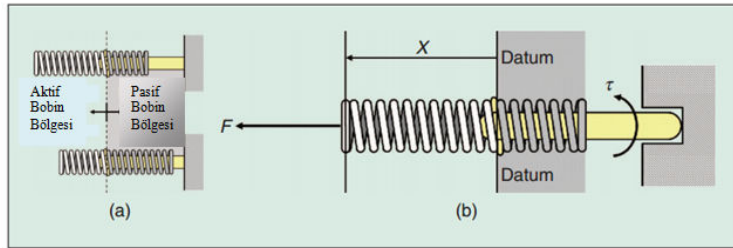


Şekil 4. AMASC tasarımının resmi ve şematik görünüşü (Hurst vd., 2004)

2.3.Yapısal Değişiklik ile Düzenlenen Eyleyiciler

Yapısal değişiklik ile düzenlenen eyleyiciler tasarımlarındaki elastik elemanın elastiklik modülü, eylemsizlik momenti ve efektif uzunluğu gibi parametrelerin birini değiştirerek eyleyicinin sertliğini değiştirmektedir. Son zamanlarda yapısal değişiklik ile düzenlenen eyleyicilerin çalışma prensibine bağlı olarak çalışan "Jack Spring" eyleyicisi olarak adlandırılan yeni bir eyleyici tipi

oluşturulmuştur. Bu tasarım yayların aktif bobin sayısını değiştirerek yay sertliğini değiştirmek için geliştirilmiştir. Bu eyleyicide elastik eleman olarak helisel bir yay kullanılmıştır. "Jack Spring" mekanizmasının sertlik ayarlaması bir yayda kullanılan aktif bobinlerin sayısını azaltarak veya artırılarak gerçekleştirilir (Hollander vd., 2005). Bu yaklaşımın kavramsal diyagramı şekil 5'de gösterilmektedir.



Şekil 5. "Jack Spring" eyleyicide aktif ve aktif olmayan bobin bölgesi (Hollander vd., 2005)

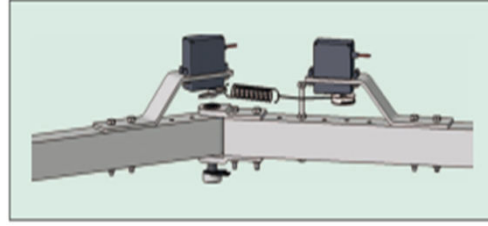
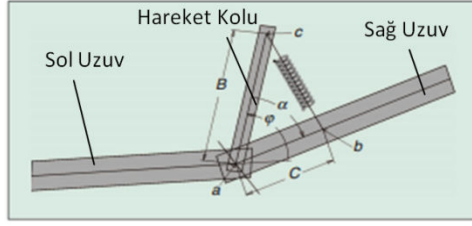
2.4.Mekanik Olarak Düzenlenen Eyleyiciler

Mekanik olarak düzenlenen eyleyicilerde de hem sertlik hem de sertliğin denge konumu ayarlanabilmektedir. Bu sınıfın en önemli özelliği eyleyicide genellikle tek bir yay gerekli olduğundan bu tek yay üzerindeki ön yük yada ön gerilme değiştirilerek sertlik ayarlaması gerçekleştirilir. Bu prensibe dayanan MACCEPA tasarımında, bir eksen etrafında dönebilen üç farklı uzuv vardır. Bu uzuvlar sol uzuv, sağ uzuv ve hareket koludur. Şekil 6'da MACCEPA tasarımının gerekli kısımları ve CAD çizimi

görülmektedir. Şekilde gösterildiği gibi bir hareket kolu eksen etrafında döner. Hareket kolu üzerindeki sabit c noktası ve sağ uzuv üzerindeki b noktası arasında bir yay yerleştirilmiştir ve bu yay ön gerilme mekanizmasına bağlanmıştır. Hareket kolu ve sol uzuv arasındaki φ açısı klasik bir servomotor ile ayarlanabilir. Hareket kolu ve sağ uzuv arasındaki α açısı sıfırdan farklı olduğunda, yayın uzaması nedeniyle oluşan kuvvet, hareket kolu ile sağ uzvu aynı hizaya getirmeye sebep olan bir T torku üretecektir. α açısı sıfır olduğunda ise (bu denge noktasıdır) yay herhangi bir tork üretemeyecektir.

Sağ uzuv üzerindeki b noktasındaki gerdirme mekanizmasında bulunan ikinci bir servomotor c ve b

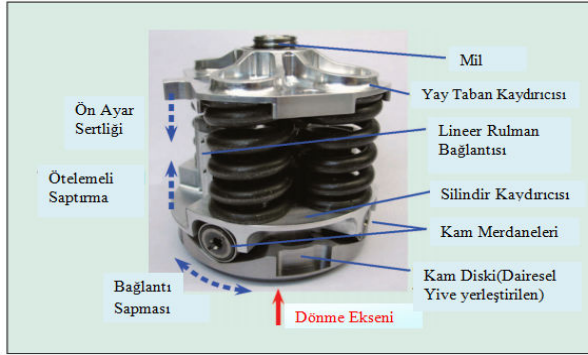
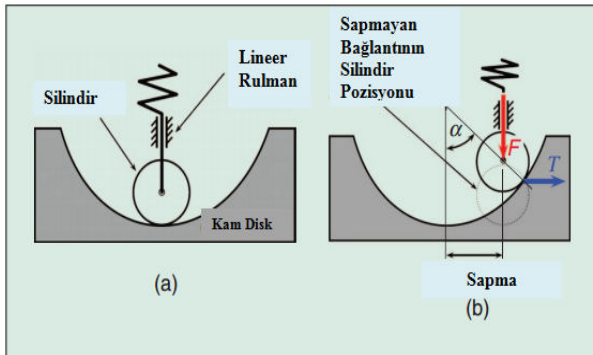
arasındaki kablonun boyunu belirler ve böylelikle yayın ön gerilmesi ayarlanır.



Şekil 6. MACCEPA'nın çalışma prensibi ve prototipin CAD çizimi (Ham vd., 2007)

Bu tasarımda dengeyi ayarlamak için hareket kolunun pozisyonu kontrol edilir. Bu eyleyici lineer bir tork-açı karakteristiğine sahip olması gibi avantajlara sahiptir. Pozisyon ve sertlik kontrolü bağımsız olarak yapılabilir (Ham vd., 2007). Aynı prensibe bağlı olarak çalışan diğer bir tasarım ise "VS-Joint" mekanizmasıdır. Bu tasarımın şematik resmi Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu tasarımda kam diski çıkış bağlantısına bağlanmıştır. Yay taban kaydırıcısının dikey pozisyonu, sertliği ayarlamak amacıyla küçük bir motorla tahrik edilerek belirlenir. Üst plaka yayları sıkıştırır. Üst plakanın açılmal pozisyonu diğer bir pozisyon motoruyla kontrol edilir. Şekil 7a'da gösterildiği gibi silindir bir yay vasıtasıyla kam diskindeki en alt noktaya doğru itilir. Çıkış bağlantısına bir tork uygulandığı zaman, Şekil 7

b'de gösterildiği gibi silindir sağa doğru bir yer değiştirme meydana getirir ve yayların yukarıya doğru yer değiştirmesine sebep olur. Yay kam disk mekanizmasının en alt noktasına silindiri itecek şekilde bir kuvvet uygular. Bu en alt nokta çıkış bağlantısının denge noktasıdır. Bu eyleyicide sertliği değiştirmek için bir ön gerilmeden ziyade bir ön yüklemeye gereklidir. Bu tasarımın avantajı bir robotik kol mekanizmasına kolayca monte edilebilir olmasıdır. Kam diskin şekli sürekli azalan ya da lineer sistem davranışı elde etmek için ayarlanabilir. Fakat bir yay yeterli olmasına rağmen, "VS-joint" tasarımında simetri için üç yay kullanılması bu tasarımın dezavantajı olarak görülmektedir (Wolf ve Hirzinger, 2008).

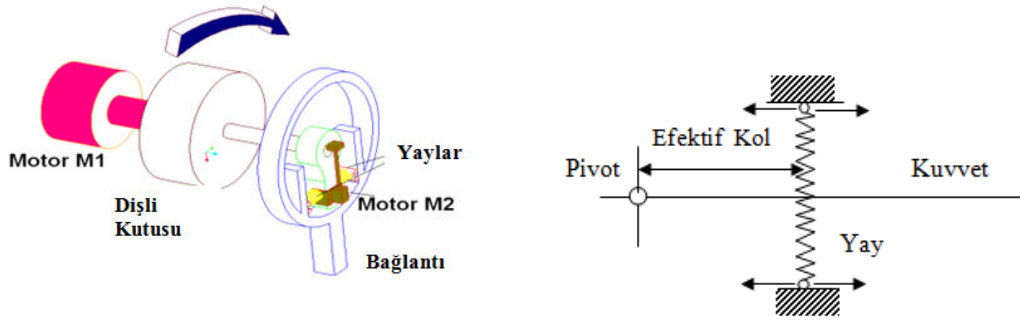


Şekil 7.VS Joint tasarımı ve şematik görüntüsü(Wolf ve Hirzinger, 2008)

2.5.İletim Oranı ile Düzenlenen Eyleyiciler

İletim oranı düzenlenen eyleyiciler yay ile çıkış bağlantısı arasındaki iletim oranını değiştirerek eyleyicinin sertliğini ayarlayabilirler. Bu tasarımda, denge noktasında yaya herhangi bir kuvvet uygulanmadığından sertliği değiştirmek için herhangi bir enerji gerekli değildir. Bu tasarım kol mekanizmasının konfigürasyondaki değişikliklere göre

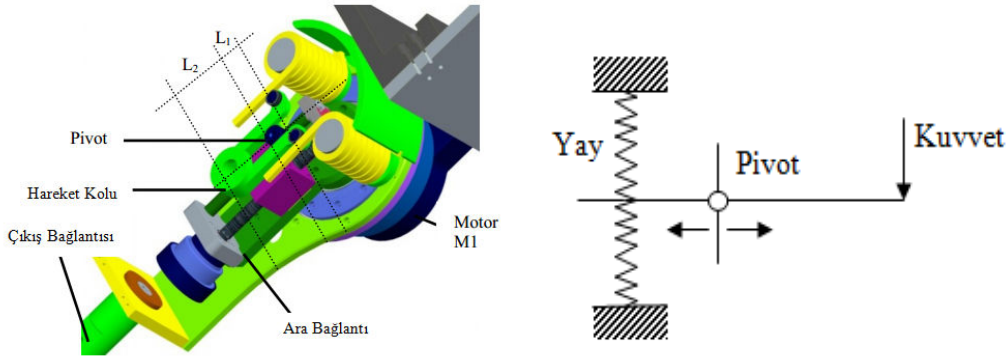
üç alt sınıfa ayrılmaktadır. Hareket kol mekanizması, pivot, yay ve kuvvet noktaları olmak üzere üç ana bölüme sahiptir. AwAS-I tasarımında sertliği değiştirmek için yay noktası değiştirilirken kuvvet ve pivot noktası sabit kalır. AwAS-I'in tasarım konsepti Şekil 8'de gösterilmiştir.Sertlik oranı hareket kolunun boyuna ve yayların sertliğine bağlıdır (Jafari vd., 2010).



Şekil 8. AwAS-I tasarım konsepti ve şematik gösterimi(Jafari vd., 2010)

AwAS-II tasarımı AwAS-I tasarımının daha ilerlemiş bir versiyonudur. Bu tasarımın tasarım konsepti ve çalışma prensibi şekil 9'da gösterilmektedir. Bu eyleyici sertliği ayarlamak için yay ve kuvvet noktaları sabit kalırken pivot noktasının pozisyonu

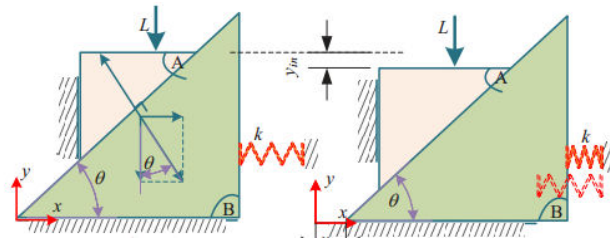
değiştirilir. Bu tasarımın en önemli avantajı bu mekanizmada pivot noktası, yay noktasına ulaştığında sertlik sıfır olurken kuvvet noktasıyla çakıştığında ise sonsuz değere kadar artabilmektedir (Jafari vd., 2011).



Şekil 9. AwAS-II tasarım konsepti ve şematik görünümü (Jafari vd., 2011)

Diğer bir tasarım olan MESTRAN tasarımı iletim açısının değiştirilmesiyle sertliği ayarlayabilen yeni bir mekanizma olarak tasarlanmıştır. Bu eyleyici tasarımının konsepti Şekil 10'da gösterildiği gibi basit bir mekanik probleminden elde edilmiştir. Yatay ve dikey duvarların yataklık ettiği A ve B blokları birbiri

üzerinden kayabilir. Diğer dikey duvar ve B bloğu arasında bir yay yerleştirilmiştir. Bu tasarımda iletim oranını değiştirilerek sertlik seviyesi elde denebilir. Belirli bir sertlik değerinin enerji ihtiyacı olmadan elde edilebilmesinden dolayı bu eyleyici enerji verimlidir (Quy vd., 2011).



Şekil 10. MESTRAN tasarım konsepti (Quy vd., 2011)

Bu tasarımlardan farklı olarak, CVT (Continuously variable transmission) mekanizmaları aracılığı ile devamlı ve sınırsız bir şekilde iletim oranı kontrol edilerek sertlik değiştirilebilir. V2E2 eyleyicisinde bu yöntem ile elastik bir eleman ve sonsuz değişken iletim oranı kullanılarak enerji verimli bir sertliği

değiştirilebilir eyleyici tasarlanmıştır (Stramigioli vd., 2008).

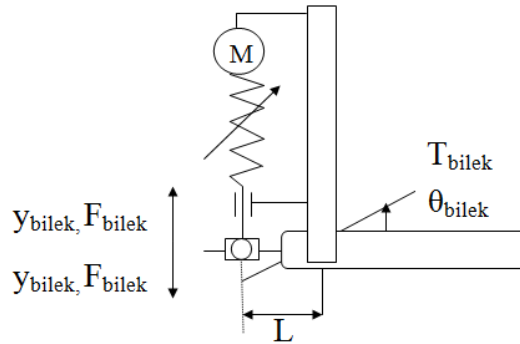
Literatürde tasarlanmış olan sertliği değiştirilebilir eyleyiciler birçok uygulamada kullanılmaya başlanmış olmasına rağmen, daha hafif, daha küçük, daha kolay denetlenebilir, geniş sertlik aralığına

sahip (sıfır sertlikten, tamamen katı setliğe kadar) yeni eyleyici tasarımları ve bu eyleyicilerin denetimi üzerine araştırmaların önümüzdeki yıllarda da devam edeceği açıktır.

3. Antagonistlik ve Ön Gerilmeli Tip Eyleyiciler

Bu bölümde antagonistlik ve öngerilmeli tasarımları simülasyon ortamında karşılaştırabilmek için gerekli olan denklem setleri sunulmaktadır. Öncelikle bu eyleyicilerin doğrusal olarak tasarlandığı varsayılmaktadır ve alt uzuv eklemleri için bu doğrusal eyleyicilerin hareketlerinin dönele hareketlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bilek eklemleri biyomekanik moment ve açı bilgileri doğrusal eyleyiciler için doğrudan kullanılamaz. Doğrusal

eyleyici tasarımlarında ayak bileği için literatürde var olan biyomekanik verilerin (ayak bileği açısı, moment ve sertlik değerleri) bilekte kullanılacak olan mekanizmaya bağlı olarak gerekli formüller ile dönüştürülmesi gerekmektedir. Dönele hareket bağlantılarını doğrusal hareketlere dönüştürmek için basit bir kuvvet kolu mekanizması kullanılır. Kuvvet uygulama noktası ve ayak bileği eksenini arasında L uzunluğunda bir kuvvet kolu düşünülerek doğrusal değerler hesaplanabilir. Doğrusal bir eyleyici için ayak bileğinde düşünülen bir mekanizmanın şematik resmi şekil 11’de verilmektedir. Ayak bileği eksenini ile doğrusal eyleyicinin kuvvet uygulama eksenini arasındaki trigonometrik ilişkiler kurularak denklem (1-7) deki dönüşüm formülleri elde edilebilir.



Şekil 11. L uzunluğunda kuvvet koluna sahip sertliği değiştirilebilir eyleyici

Doğrusal eyleyici ve ayak bileği arasındaki ilişki denklem (1) ve (2) deki gibi ifade edilmektedir.

$$y_{bilek} = L \cdot \tan \theta_{bilek} \quad (1)$$

$$T_{bilek} = L \cdot F_{bilek} \quad (2)$$

Bu denklemlerdeki θ_{bilek} , T_{bilek} , F_{bilek} ifadeleri sırası ile bilek açısını, bilek momentini ve bileğe yerleştirilen doğrusal eyleyici ile ayak arasındaki etkileşim kuvvetini temsil etmektedir.

Denklem (1) ve (2) θ_{bilek} , T_{bilek} , F_{bilek} değişkenlerine göre türevi alındığında denklem (3) ve (4) formuna dönüşür;

$$dy_{bilek} = \frac{L}{\theta_{bilek}(\cos \theta_{bilek})^2} d\theta_{bilek} \quad (3)$$

$$dT_{bilek} = L dF_{bilek} \quad (4)$$

Doğrusal eyleyicinin ve ayak bileğinin sertliği de denklem (5) ve (6) daki gibi ifade edilir:

$$K_{y_{bilek}} = \frac{dF_{bilek}}{dy_{bilek}} \quad (5)$$

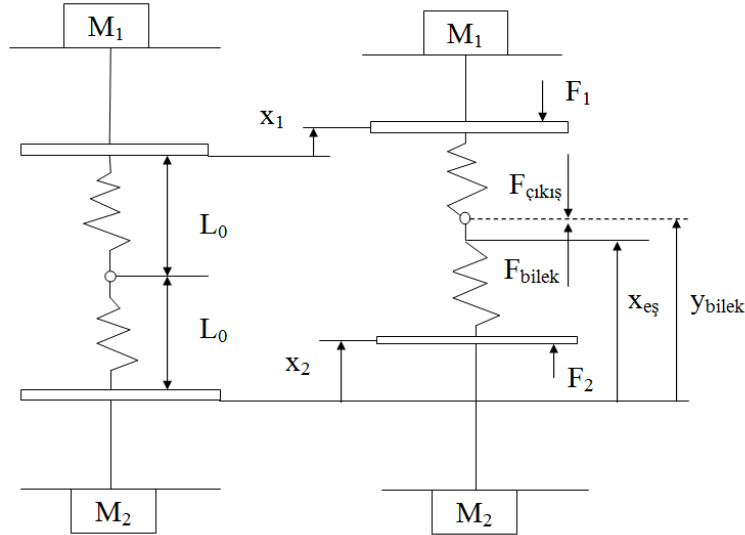
$$K_{\theta_{bilek}} = \frac{dT_{bilek}}{d\theta_{bilek}} \quad (6)$$

Sonuç olarak denklem (4), (5) ve (6) düzenlenirse doğrusal eyleyici için sertlik değeri ayak bileği açısı ve ayak bileği sertliği cinsinden denklem (7) daki gibi bulunmaktadır;

$$K_{y_{bilek}} = \frac{\theta_{bilek}(\cos \theta_{bilek})^2}{L^2} K_{\theta_{bilek}} \quad (7)$$

3.1. Antagonistlik Tip Eyleyiciler

Antagonist tasarım iki farklı seri elastik eyleyicinin karşılıklı olarak bağlanmış halidir. Bu tasarımlarda karşılıklı olarak bağlanmış non-lineer yaylar iki farklı motor ile eş zamanlı kontrol edilerek eyleyicinin denge konumu ve sertliği ayarlanabilmektedir. Sertliği değiştirilebilir eyleyicilerin eşdeğer çıkış sertlik karakteristiğinin lineer olması istenmektedir. Bu nedenle antagonistlik sertliği değiştirilebilir eyleyici tasarımlarında kullanılan yayların ikinci dereceden (kuadratik) lineer olmayan yaylar olması gerekmektedir. Şekil 12’de doğrusal antagonistlik bir tasarımın şematik resmi verilmektedir.



Şekil 12. Doğrusal antagonist sertliği değiştirilebilir eyleyici tasarımının şematik gösterimi

Bu çizimde gösterilen $x_{eş}$, y_{bilek} , $F_{çıkış}$, F_{bilek} , F_1 , F_2 , x_1 , x_2 , L_0 sırası ile eyleyicinin denge konumunu, ayak bileğinin konumunu, doğrusal eyleyicinin çıkış kuvvetini, ayak bileğinin eyleyici üzerinde oluşturduğu kuvveti, birinci motorun uyguladığı kuvveti, ikinci motorun uyguladığı kuvveti ve tasarımda kullanılan yayların serbest uzunluklarını göstermektedir.

Tasarımda kullanılan yayların ikinci dereceden (kuadratik) yay özelliğine sahip oldukları düşünüldüğünde ayak bileği kuvveti her iki motor tarafından uygulanan kuvvetlerin farkı şeklinde denklem (8)'deki gibi ifade edilir. Buradaki K ifadesi tasarımda kullanılan ikinci dereceden yay modelinin oransal yay sabitini göstermektedir ($F_{yay} = K \cdot x^2$).

$$F_{bilek} = -F_{çıkış} = K \left[\left(\frac{x_2 - x_1}{2} \right) + (y_{bilek} - x_{eş}) \right]^2 - K \left[\left(\frac{x_2 - x_1}{2} \right) - (y_{bilek} - x_{eş}) \right]^2 \quad (8)$$

Bu denklem tekrar düzenlenirse, denklem (9)'daki forma dönüşmektedir;

$$F_{bilek} = 2K(x_2 - x_1)x_{eş} - 2K(x_2 - x_1)y_{bilek} \quad (9)$$

Denklem (9)'dan $x_{eş}$ çekilirse denklem (10)'daki eşitlik elde edilir;

$$x_{eş} = \frac{F_{bilek}}{2K(x_2 - x_1)} + y_{bilek} \quad (10)$$

Yine denklem (9), (y_{bilek}) değişkenine göre türevi alınırsa eyleyicinin eşdeğer sertlik değeri denklem (11)'deki gibi bulunur. Bu değer aynı zamanda bilekte olması istenen sertlik değeri ($K_{eş} = K_{bilek}$) olarak düşünülebilir.

$$K_{eş} = K_{bilek} = \frac{\partial F_{bilek}}{\partial y_{bilek}} = 2K(x_2 - x_1) \quad (11)$$

Denklem (11)'den $x_2 - x_1$ çekilip denklem (10)'da yerine yazılırsa $x_{eş}$ denklem (12)'deki forma dönüşmektedir;

$$x_{eş} = \frac{F_{bilek}}{K_{bilek}} + y_{bilek} \quad (12)$$

Diğer taraftan şekil 12'den yararlanarak eyleyicinin denge konumu denklem (13)'deki gibi ifade edilebilmektedir:

$$x_{eş} = x_2 + L_0 - \left(\frac{x_2 - x_1}{2} \right) \quad (13)$$

Bu denklem tekrar düzenlenirse denklem (14)'deki forma dönüşür;

$$x_{eş} = \left(\frac{x_1 + x_2}{2} \right) + L_0 \quad (14)$$

Sonuçta denklem (14) ve (12) eşitlenirse $(x_1 + x_2)$ denklem (15)'deki forma dönüşür;

$$x_1 + x_2 = 2 \frac{F_{bilek}}{K_{bilek}} + 2y_{bilek} - 2L_0 \quad (15)$$

Yukarıdaki denklemlerde kullanılan (y_{bilek}) sembolü doğrusal eyleyicinin çıkışına karşılık gelen doğrusal yer değiştirmeleri göstermektedir ve ayak bileği için kullanılan biyomekanik bir yer değiştirme verisi $(y_{bilek-bio})$ yayın serbest uzunluğu ile toplandıktan sonra eyleyici için kullanılmalıdır. Dolayısı ile doğrusal eyleyicinin çıkışının yer değiştirmesi ayak bileğinin biyomekanik yer değiştirme değeri cinsinden denklem (16)'deki gibi ifade edilir ve böylece denklem (15) biyomekanik

bilek eklemi yer değiştirme miktarı cinsinden denklem (17)'deki hale dönüşmektedir.

$$y_{bilek} = Y_{bilek-bio} + L_0 \quad (16)$$

$$x_1 + x_2 = 2 \frac{F_{bilek}}{K_{bilek}} + 2y_{bilek-bio} \quad (17)$$

Bununla birlikte denklem (11)'den (x_2-x_1) çekilirse ve denklem (17) ile ortak çözümlerse, birinci ve ikinci motorların yer değiştirmeleri sırası ile denklem (18) ve (19)'daki gibi bulunur;

$$x_1 = \frac{F_{bilek}}{K_{bilek}} + y_{bilek-bio} + \frac{K_{bilek}}{4K} \quad (18)$$

$$x_2 = \frac{F_{bilek}}{K_{bilek}} + y_{bilek-bio} - \frac{K_{bilek}}{4K} \quad (19)$$

Daha öncede bahsedildiği gibi denklem (11)'deki ilk terim birinci motorun uyguladığı kuvveti, ikinci terim ise ikinci motorun uyguladığı kuvveti göstermektedir. Bu terimler sadeleştirildiğinde motorlar tarafından uygulanan kuvvetler sırası ile denklem (20) ve (21)'deki gibi ifade edilir;

$$F_1 = K[y_{bilek-bio} - x_1]^2 \quad (20)$$

$$F_2 = K[x_2 - y_{bilek-bio}]^2 \quad (21)$$

Sonuç olarak doğrusal bir antagonistlik eyleyici için gerekli olan güç gereksinimi (P) ve eyleyici tarafından

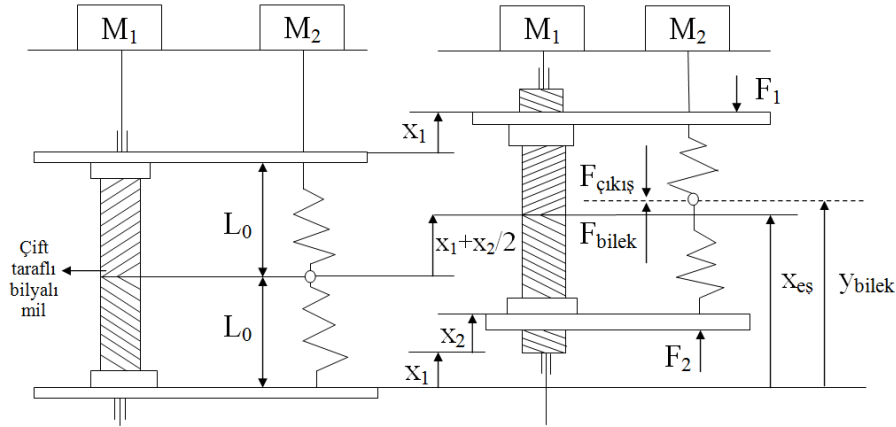
sarfedilen enerji (W), denklem (22) ve (23)'deki gibi hesaplanabilmektedir. Bu denklemlerdeki birinci ve ikinci terimler yine sırası ile birinci ve ikinci motorun güç gereksinimi ve bu motorlar tarafından harcanan enerjileri ifade etmektedir.

$$P = F_1 \cdot \dot{x}_1 + F_2 \cdot \dot{x}_2 \quad (22)$$

$$W = \int |F_1 \dot{x}_1| dt + \int |F_2 \dot{x}_2| dt \quad (23)$$

3.2.Ön Gerilmeli Tasarım

Bu makalede örnek olarak ele alınan ön gerilmeli eyleyici tasarımlarında karşılıklı olarak bağlanmış iki lineer olmayan yay tek bir motor (M_1) ile karşılıklı olarak sıkıştırılmakta; böylece eyleyicinin çıkış noktası olan yayların bağlantı noktasındaki sertlik devamlı olarak ayarlanabilmekte ve ikinci bir motor (M_2) ile de eyleyicinin denge konumu ayarlanmaktadır. Şekil 13' te bu makale için referans alınmış öngerilmeli doğrusal bir sertliği değiştirilebilir eyleyicinin şematik çizimi verilmektedir. Bu şematik gösterimde eyleyicinin çıkış sertliğini değiştirmek için birinci motor çift taraflı bir bilyeli mil - somun mekanizması ile yayları karşılıklı ve eşit miktarda sıkıştırmaktadır. Böylece ikinci dereceden (kuadratik) lineer olmayan yayların karşılıklı olarak eşit miktarda sıkıştırılması ile bağlantı noktasındaki sertlik değiştirilebilmektedir.



Şekil 13. Ön gerilmeli bir eyleyici tasarımı şematik gösterimi

Şekil 13'deki doğrusal öngerilmeli bir eyleyicinin şematik çiziminde gösterilen $x_{eş}$, y_{bilek} , $F_{çıkış}$, F_{bilek} , F_1 , F_2 , x_1 , x_2 , L_0 sırası ile eyleyicinin denge konumunu, ayak bileğinin konumunu, doğrusal eyleyicinin çıkış kuvvetini, ayak bileğinin eyleyici üzerinde oluşturduğu kuvveti, birinci motorun uyguladığı kuvveti, ikinci motorun uyguladığı kuvveti ve tasarımda kullanılan yayların serbest uzunluklarını göstermektedir. Öngerilmeli eyleyici tasarımda da kullanılan yayların ikinci dereceden (kuadratik) yay

özelliğine sahip oldukları düşünüldüğünde ayak bileği kuvveti denklem (24)'deki gibi ifade edilir. Buradaki K ifadesi tasarımda kullanılan ikinci dereceden yay modelinin oransal yay sabitini göstermektedir ($F_{yay} = K \cdot x^2$). Öngerilmeli tasarım antagonistlik tasarımdan farklı olarak eyleyicinin çıkışındaki, ayak bileği ile olan etkileşim kuvveti doğrudan ikinci motor (M_2) tarafından karşılanmaktadır ($F_{bilek} = -F_{çıkış} = -F_2$).

$$F_{\text{bilek}} = -F_{\text{çıkış}} = -F_2 = K \left[\left(\frac{x_2}{2} \right) + (y_{\text{ank}} - x_{eş}) \right]^2 - K \left[\left(\frac{x_2}{2} \right) - (y_{\text{bilek}} - x_{eş}) \right]^2 \quad (24)$$

Bu denklem tekrar düzenlenirse, denklem (25)'deki forma dönüşmektedir;

$$F_{\text{bilek}} = 2Kx_2y_{\text{bilek}} - 2Kx_2x_{eş} \quad (25)$$

Bu denklem y_{bilek} değişkenine göre türevi alınırsa eyleyicinin eşdeğer sertlik değeri (aynı zamanda bilekte olması istenen sertlik değeri) denklem (26)'daki gibi bulunur;

$$K_{eş} = K_{\text{bilek}} = \frac{\partial F_{\text{bilek}}}{\partial y_{\text{bilek}}} = 2Kx_2 \quad (26)$$

Denklem (26)'dan ikinci motorun yer değiştirme miktarı (x_2) kolaylıkla bulunabilmektedir;

$$x_2 = \frac{K_{\text{bilek}}}{2K} \quad (27)$$

Diğer taraftan eyleyicinin denge konumu $x_{eş}$, şekil 13' te verilen şematik çizime göre ve denklem (25)'e göre denklem (28) ve (29)'daki gibi iki farklı şekilde ifade edilebilmektedir;

$$x_{eş} = x_1 + L_0 + \frac{x_2}{2} \quad (28)$$

$$x_{eş} = \frac{-F_{\text{ank}} + 2Kx_2y_{\text{bilek}}}{2Kx_2} \quad (29)$$

Bu iki denklem eşitlenirse x_2 yerine denklem (27)'de elde edilen ifade yazılırsa, birinci motorun yer değiştirme miktarı (x_1) denklem (30)'daki gibi bulunur;

$$x_1 = -\frac{F_{\text{bilek}}}{2Kx_2} + y_{\text{bilek}} - \frac{x_2}{2} - L_0 \quad (30)$$

Antagonistlik eyleyicinin denklem türetimlerinde olduğu gibi denklemlerde kullanılan (y_{bilek}) sembolü doğrusal eyleyicinin çıkışına karşılık gelen doğrusal yer değiştirme göstermektedir ve ayak bileği için kullanılan biyomekanik bir yer değiştirme verisi ($y_{\text{bilek-bio}}$) yayın serbest uzunluğu (L_0) ile toplandıktan sonra eyleyici için kullanılmalıdır. Dolayısı ile doğrusal eyleyicinin çıkışının yer değiştirmesi ayak bileğinin biyomekanik yer değiştirme değeri cinsinden bir önceki bölümdeki denklem (16)'daki gibi ifade edilir ve x_2 yerine denklem (27) (y_{bilek}) yerine denklem (16) yazılarak, birinci motorun yer değiştirme miktarı denklem (31)'deki gibi son haline getirilmektedir;

$$x_1 = -\frac{F_{\text{bilek}}}{K_{\text{bilek}}} + y_{\text{bilek-bio}} - \frac{K_{\text{bilek}}}{4K} \quad (31)$$

Daha öncede belirtildiği gibi öngerilmeli eyleyici tasarımında ayak bileği tarafından uygulanan kuvvet tıpkı seri elastik eyleyicilerde olduğu gibi doğrudan ikinci motor tarafından karşılanmaktadır. Dolayısı ile

ikinci motor tarafından uygulanan kuvvet biyomekanik ayak bileği kuvvetine eşittir ($F_2 = -F_{\text{bilek}}$). Birinci motor tarafından uygulanan kuvvet ise Şekil 13'de altta kalan yayın sıkışma miktarından kaynaklanan kuvvete eşittir ve denklem (32)'deki gibi ifade edilir.

$$F_2 = K[(x_1 + x_2) - (y_{\text{ank}} - L_0)]^2 \quad (32)$$

Bu denklemde y_{bilek} , x_2 ve x_1 yerine denklem (16), (27) ve (31)'de verilen ifadeler yazılırsa, ikinci motor tarafından uygulanan kuvvet en sade hali ile denklem (33)'deki forma dönüşür;

$$F_2 = K \left[-\frac{F_{\text{bilek}}}{K_{\text{bilek}}} + \frac{K_{\text{bilek}}}{4K} \right]^2 \quad (33)$$

Sonuç olarak doğrusal bir öngerilmeli eyleyici için gerekli olan güç gereksinimi (P) ve eyleyici tarafından sarfedilen enerji antagonistlik tasarımda olduğu gibi (W), denklem (34) ve (35)'deki gibi hesaplanabilmektedir. Bu denklemlerdeki birinci ve ikinci terimler sırası ile birinci ve ikinci motorun güç gereksinimi ve bu motorlar tarafından harcanan enerjileri ifade etmektedir.

$$P = F_1 \cdot \dot{x}_1 + F_2 \cdot \dot{x}_2 \quad (34)$$

$$W = \int |F_1 \dot{x}_1| dt + \int |F_2 \dot{x}_2| dt \quad (35)$$

4. Simülasyon ve tartışma

Sertliği değiştirilebilir eyleyiciler için literatürde farklı tiplerde tasarımların var olduğu önceki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılmıştı. Bu bölümde ise antagonistlik ve mekanik olarak öngerilme ile ayarlanan sertliği değiştirilebilir iki tip eyleyici tasarımının bir dış iskelet robotun ayak bileğinde kullanılması durumundaki simülasyon sonuçları sunulmaktadır ve bu simülasyon sonuçları ile ilgili değerlendirmeler verilmektedir. Simülasyon çalışmalarına giriş yapmadan önce tasarımların test edileceği ayak bileği için biyomekanik verilere ihtiyaç vardır.

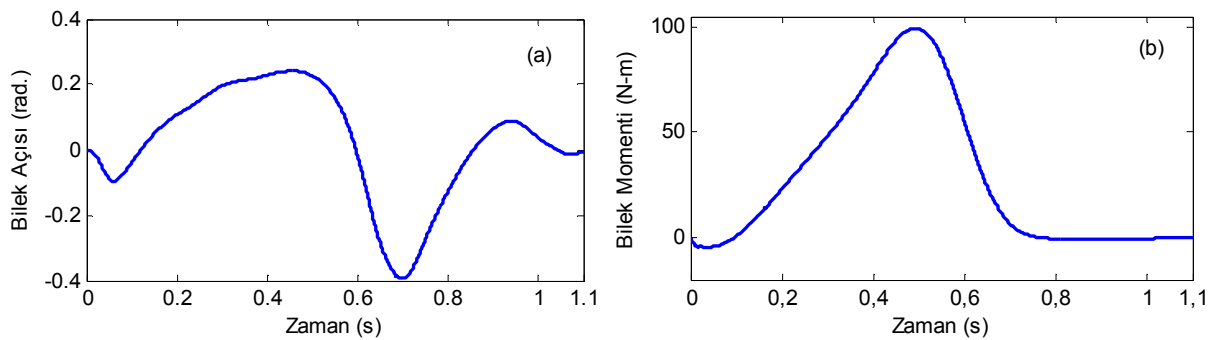
İnsan alt uzuv eklemleri ile ilgili literatürde birçok biyomekanik çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda kamera ve uzuvlara yerleştirilen markerler kullanılarak farklı kişilerin farklı yürüme hızlarında yürüme paternleri izlenip, bu paternlerin işlenmesi ile alt uzuv eklemlerinin açı değerleri, hızları ve ivmeleri elde edilmektedir. Ayrıca belirli boy ve kilodaki kişiler için alt uzuvların kütleleri ve ataletleri biyomekanik kitaplarında mevcuttur. Yürüme deneylerinden elde edilen bu eklem açıları, hızları ve ivmeleri ters dinamik denklemlerinde kullanılarak

yürüme döngüsü esnasındaki alt uzuv eklemlere için moment ve güç grafikleri hesaplanabilmektedir.

Öncelikle ayak bileğinin biyomekanik davranışının anlaşılması gerekmektedir. Literatürdeki bazı biyomekanik çalışmaları (Palmer, 2002; Gates, 2004; Hansen vd., 2004; Inman vd., 1981; Hof vd., 1983) kullanılarak bilek ekleminin biyomekanik işleyişi şu şekilde özetlenebilir: Düz yüzey yürüme döngüsü (ground-level walking cycle) bir ayağın topuk-vurma (heel-strike) hareketi ile başlamakta ve aynı ayağın bir sonraki topuk-vurma hareketi ile sonlanmaktadır. Yürüme döngüsü iki ana bölüme ayrılmaktadır. Bunlar bir döngünün ilk % 60'lık kısmına karşılık gelen basma fazı (stance-phase) ve son % 40'lık kısmına karşılık gelen salınım fazıdır (swing-phase). Basma fazı topuk yere değdiği zaman topuk-vurma hareketi ile başlar, ayak parmak ucunun yer ile temasının kesildiği zaman olan parmak-ucu-kalkış (toe-off) hareketine kadar devam eder. Salınım fazı ise ayak parmak ucunun yerle temasının kesildiği zaman olan parmak-ucu-kalkış hareketinden topuğun yere değdiği zaman topuk-vurma hareketine kadar geçen bölüme karşılık gelir. Ayrıca, basma fazı kendi içinde ara fazlara ayrılmaktadır. Bunlar, kontrollü plantar fleksiyon (Controlled plantar flexion), kontrollü dorsal fleksiyon (controlled dorsi-flexion) ve kuvvetli plantar-fleksiyon (powered plantar flexion) ara fazlarıdır ve şu şekilde tanımlanabilir. Kontrollü plantar-fleksiyon topuk-vurma hareketi ile başlar tam-basma (foot-flat) hareketi ile sonlanır, kontrollü dorsal-fleksiyon tam-basma hareketi ile başlar ayağın bileğinin yukarı bükülmesinin en üst seviyesine kadar devam eder, kuvvetli plantar-fleksiyon ayak bileğinin maksimum bükülmesinden parmak-ucu-kalkış hareketine kadar olan kısımdır. Kontrollü plantar-fleksiyon ara fazında ayak bileği bir

lineer yay gibi davranır, eklem momenti bilek pozisyonu ile doğrusaldır. Kontrollü dorsal-fleksiyon ara fazında ayak bileği lineer olmayan bir yay hareketi gibi davranır, eklem momenti bilek pozisyonunun artışı ile doğrusal olmayan bir artış göstermektedir. Bu ara fazda bilek bir sonraki plantar-fleksiyon ara fazında vücudu yukarı ve ileri hareket ettirebilmek için elastik enerji depolar. Kuvvetli plantar-fleksiyon ara fazında bilek mançlık mekanizması gibi davranır. Bu ara fazın ilk yarısında bilek tıpkı bir motorun bir yayı sıkıştırması gibi bilek üzerinde ani enerji depolaması gerçekleştirir ve ikinci yarısında bu depolanan enerji vücudu yukarı ve ileri hareket ettirmek için bırakılır. Kuvvetli plantar-fleksiyon ara fazında, harcanan enerji bir önceki ara fazda depolanan enerjiden daha fazla olduğu için mançlık mekanizması davranışı bu ara fazda gereklidir. Bundan sonraki salınım fazında ise ayağın yer ile bağlantısı kesilmiştir ve ayağı bir sonraki yürüyüş döngüsüne (topuk-vurma) hazırlamak için bilek eklemi esnek bir pozisyon denetleyicisi gibi davranış gösterir. Bu açıklamalardan da anlaşıldığı gibi ayak bileğinin sertliği yürüme döngüsü sırasında sürekli değişmektedir ve bu değişim uygulanan kuvvet ve ayak bileğinin açılmalık yer değiştirmesi ile ilişkilidir.

Simülasyon çalışmalarında öncelikle ayak bileğine ait açı ve moment değerleri için biyomekanik verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada Bovi ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir biyomekanik çalışmasındaki veriler kullanılmıştır (Bovi vd., 2010). Bu verilere göre ortalama 80 kg ağırlığındaki yetişkin bir insanın optimum/ortalama yürüme hızındaki ($0.8 \leq$ kişi yürüme hızı / kişi boy uzunluğu < 1) ayak bileği eklemi açı ve moment grafikleri Şekil 14'de verilmektedir.



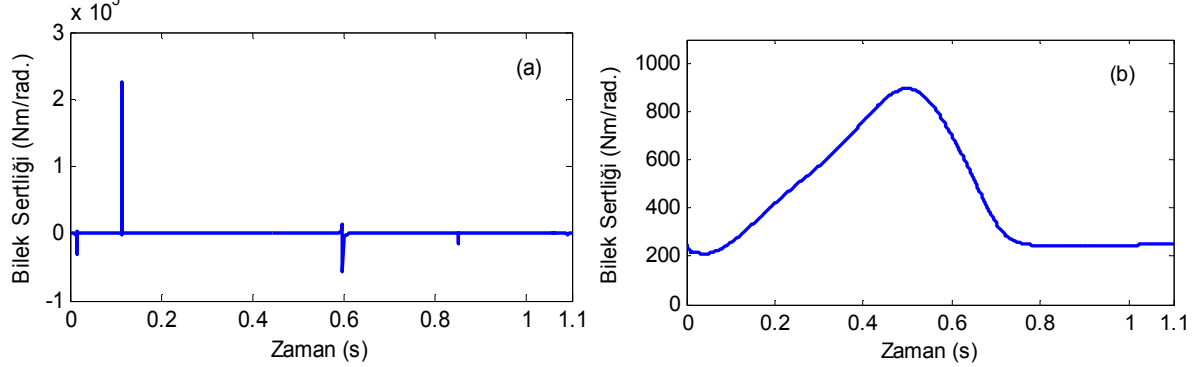
Şekil 14. Düz yüzey yürüme esnasında ayak bileği eklemi açısı (a) ve moment (b) değerleri

Yürüme esnasında ayak bileğinin sertlik değerlerini hesaplamak için Şekil 14'de verilen moment değerleri ayak bileği açı değerlerine bölüldüğünde Şekil 15(a)'da gösterilen gerçekleşmesi aşırı zor olan sertlik değerleri çıkmaktadır. Bu değerler herhangi bir sertliği değiştirilebilir eyleyici ile sağlanmak istenildiğinde çok kısa zaman içerisinde çok yüksek sertlik değerlerine ulaşmanın eyleyiciden çok yüksek değerlerde güç gerektireceğinden uygulanabilir değildir. Bu nedenle Halgate ve arkadaşları bu sertlik

grafliğini modifiye edilmesini önermemişlerdir (Holdate., 2008). Bu çalışmada önerilen yöntemde göre bilek açısında bir öteleme gerçekleştirilerek sertlik değerlerinin istenilen mertebelere çekmesi hedeflenmiştir. Holgate ve arkadaşları tarafından önerilen bu yöntemde ayak bileği salınım fazında iken sertlik değeri 0 etrafında dolaşmaktadır. 0 sertlik değerinde ise ayak bileğinin salınım fazında iken istenmeyen salınımlara maruz kalması kaçınılmazdır. Bu nedenle elde edilen sertlik

değerlerine ikinci bir öteleme daha eklenerek ayak bileğinin istenmeyen salımlarının önüne geçilebilecektir. Buna göre Şekil 14'daki veriler ve denklem (36) kullanılarak modifiye edilmiş sertlik değerleri Şekil 15(b)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$K_{bilek} = A \frac{T_{bilek}}{\theta_{bilek} + \theta_{öteleme}} + K_{öteleme} \quad (36)$$

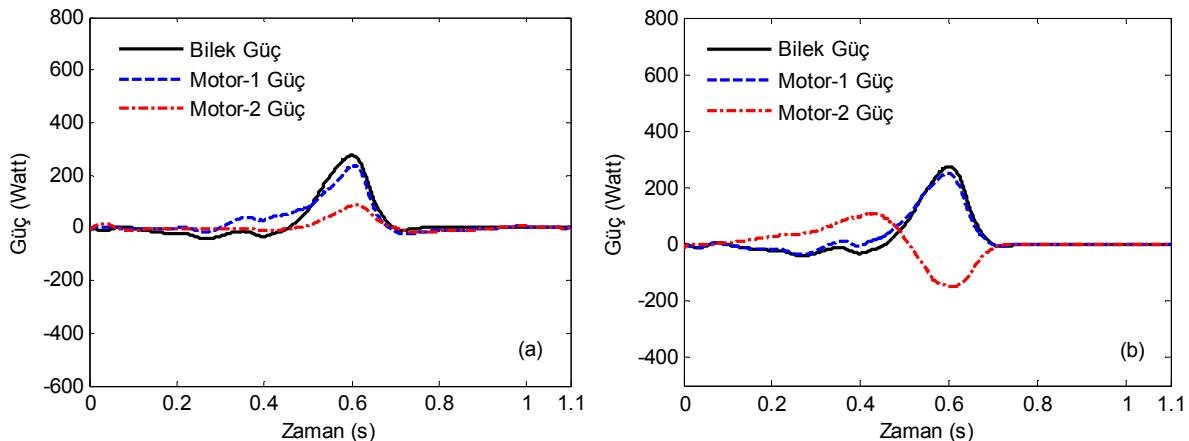


Şekil 15.(a) Doğrudan bilek sertliği hesabı, (b) Modifiye edilmiş bilek sertliği hesabı

Antagonistlik ve mekanik olarak öngerilme ile ayarlanan tasarımlar için denklemlerin türetimi bölüm 3'teyarıntılı olarak anlatılmıştı. Bu denklemler kullanılarak MATLAB Simulink®'te iki tasarımın simülasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon çalışmalarında bilek sertlik değerleri olarak Şekil 15(b)'de verilen modifiye edilmiş sertlik değerleri ve Şekil 14'de verilen bilek açısı ve tork değerleri referans alınmıştır. Her iki tasarımın simülasyon çalışmalarında ikinci dereceden (kuadratik) yay modeli kullanılmıştır ve bu yayın yay katsayısı oranı $K_{oran}=800 \text{ kN/m}^2$ olarak alınmıştır. Bununla birlikte doğrusal olarak tasarlanan bu eyleyicilerin bilek ekleminde olan yatay moment kolu uzunluğu (L) 10 cm alınmıştır. Şekil 16 ve 17'de her iki tasarımda kullanılan motorların güç

Denklem (36)'daki K_{bilek} simülasyonlarda kullanılmak üzere ayak bileğinin hesaplanan sertlik değerini, T_{bilek} ayak bileğinin momentini, θ_{bilek} ayak bileğinin açısını, $\theta_{öteleme}$ ayak bileğinin açısındaki ötelemeyi, K_{bilek} ayak bileği sertlik değerinin ötelemesini ve A da ayar çarpanını göstermektedir.

gereksinimleri ile bu motorlar tarafından harcanan enerji miktarları karşılıklı olarak sunulmaktadır. Bu grafiklere ayrıca insan ayak bileğinin biyomekanik güç ve enerji değerleri de çizdirilmiştir. Şekil 16'da her iki tasarım için verilen güç grafikleri incelendiğinde, her iki tasarımda kullanılan ilk motorların 300 W civarında benzer güç gereksinimlerine ihtiyaç duyulurken, ikinci motorların güç gereksinimlerinde farkların olduğu görülmektedir. Referans alınan simülasyon senaryosuna göre antagonistlik tasarımında ikinci motor için 100 W civarında güç gereksinimine ihtiyaç duyulurken öngerilmeli tasarımda 200 W civarında bir güç gereksinimi bulunmaktadır. Dolayısı ile antagonistlik tasarımda daha küçük motorlarla çalışmak mümkündür.



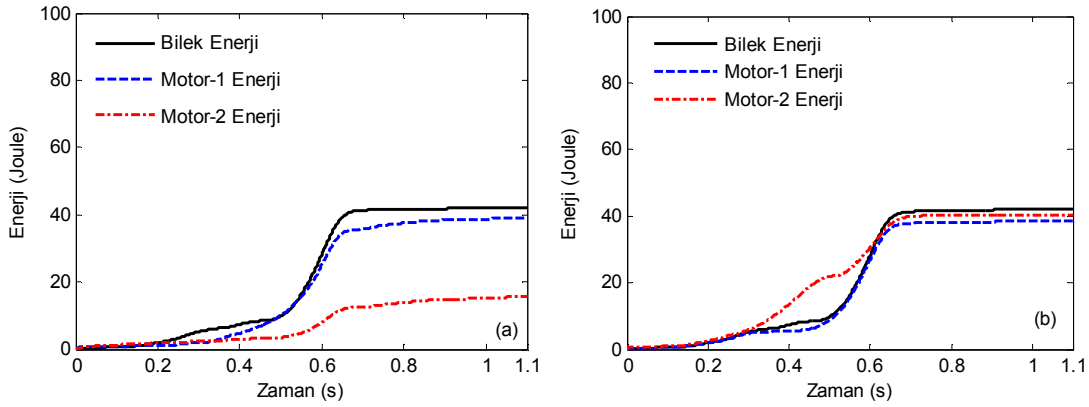
Şekil 16.(a) Antagonistlikve (b) öngerilmeli tasarımların güç gereksinimleri

Güç gereksinimi grafiklerine benzer şekilde Şekil 17'demotorlar tarafından harcanan enerjiler sunulmaktadır. Güç gereksinimi grafiklerinde olduğu gibi her iki tasarımın ilk motorlarında benzer enerji

sarfiyatı görülmesine karşın ikinci motorlarda harcanan enerji değerleri arasında önemli düzeyde farklar oluşmaktadır. Antagonistlik tasarımın ikinci motorunda 15J civarında enerji harcanırken

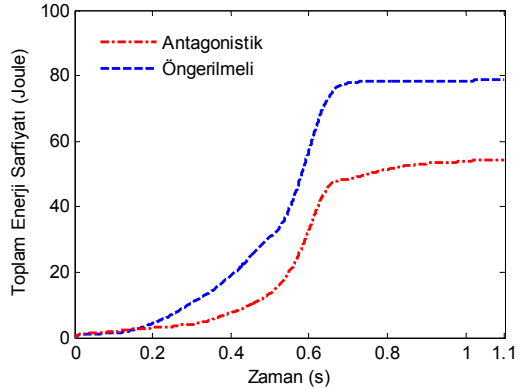
öngerilmeli tasarımda bu değer % 100 daha fazladır

ve 40 J civarındadır.



Şekil 17.(a) Antagonistlik ve (b) öngerilmeli tasarımlarda harcanan enerji miktarı

Son olarak enerji sarfıyatı açısından antagonistik ve öngerilmeli tasarımları bir bütün olarak değerlendirmek için motorlar tarafından harcanan enerjilerin toplamı Şekil 18'deki grafikte gösterilmektedir. Bu grafik değerlendirildiğinde, 80 kg'lık bir kişinin optimum bir hız ile (orta hızda) düz yüzeyde yürüme senaryosunda bir yürüme döngüsünde antagonistik tasarım ayak bileği eklemi için 55 J civarında enerji harcamaktayken öngerilmeli tasarım 80 J civarında enerji harcamaktadır. İki tasarım arasındaki önemli ölçüde olan bu enerji sarfıyatı bataryalar ile çalıştırılan mobil insansı robotlar için son derece önemlidir. Dolayısı ile dış iskelet robotlarda enerji sarfıyatı açısından antagonistik tasarımın kullanılmasının daha doğru bir seçim olacağı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 18.(a) Antagonistlik ve (b) öngerilmeli tasarımlarda harcanan toplam enerji miktarları

5. Sonuç

Öncelikli olarak, bu çalışmada literatürde var olan sertliği değiştirilebilir eyleyiciler, denge konumu ile düzenlenen eyleyiciler (equilibrium controlled actuators), antagonistik etkileşim ile düzenlenen eyleyiciler (antagonistic controlled actuators), yapısal değişiklik ile düzenlenen eyleyiciler (structure controlled actuators), mekanik olarak düzenlenen eyleyiciler (mechanically controlled) ve iletim oranı değiştirilerek sertliği ayarlanabilen eyleyiciler olmak üzere beş ana grup halinde ayrıntılı olarak

anlatılmıştır. Daha sonra tasarım kolaylığı nedeni ile tercih edilen antagonistik ve mekanik olarak ön gerilme ile ayarlanan tasarımlar için denklemler elde edilmiştir. Çalışmanın devamında ise antagonistik ve mekanik olarak ön gerilme ile ayarlanan bu iki tip eyleyici tasarımlarının dış iskelet robotlarında ayak bileği bağlantısında kullanılması durumunda güç gereksinimi ve enerji sarfıyatı açısından simülasyon ortamında karşılaştırılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre, enerji ihtiyacı bataryalarla sağlanan dış iskelet robotlarda minimum enerji sarfıyatı ve minimum güç gereksinimi açısından antagonistik tasarımın kullanılmasının ön gerilmeli tasarımdan daha uygun olduğu anlaşılmıştır.

Teşekkür

Yazarlar bu makale ile ilgili olarak 213M297 no'lu "Biyomimetik Bir Alt Uzun Dış İskelet Robotun Tasarımı ve Denetimi" başlıklı kariyer projesi ile finansal destek sağlamasından dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunmaktadırlar.

Kaynaklar

Alexander, R.M., 2010. Three uses of springs in legged locomotion. Int. J. Robot. Res. Special Issue on Legged Locomotion, 9(2), 53-61

Bovi, G., Rabuffetti, M., Mazzoleni, P., Ferrarin, M., 2010. A multiple-task gait analysis approach: kinematic, kinetic and EMG reference data for healthy young and adult subjects, Gait and Posture, 33, 6-13

Catalano, M., Grioli, G., Garabini, M., Bonomo, F., Mancini, M., Tsagarakis, N., Bicchi, A., 2005. VSA-CubeBot: a modular variable stiffness platform for multiple degrees of freedom robots. IEEE International Conference on Robotics and Automation, USA, 5090-5095

Gates, D.H., 2004. Characterizing ankle function during stair ascent, descent, and level walking for

ankle prosthesis and orthosis design, (Master thesis), Boston University.

Hansen, A.H., Childress, D.S., Miff, S. Gard, S., Mesplay, K., 2004. The human ankle during walking: implication for the design of biomimetic ankle prosthesis. *Journal of Biomechanics*, 37, 1467-1474

Hof, A.L., Geelen, B.A., Berg, J.V., 1983. Calf muscle moment, work and efficiency in level walking: role of series elasticity, *Journal of Biomechanics*, 16 (7), 523-537

Holgate, M.A., Hitt, J.K., Bellman, R.D., Sugar, T.G., Hollander, K.W, 2008. The SPARK (Spring Ankle with Regenerative kinetics) project: Choosing a DC motor based actuation method, 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, USA, 163-168

Hollander, K.W., Ilg R., Sugar, T.G., Herring, D., 2006. An efficient robotic tendon for gait assistance, *J. Biomech. Eng.*, 128(5), 788-791

Hurst, W., Chestnutt, J., Rizzi, A., 2004. An actuator with physically variable stiffness for highly dynamic legged locomotion. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, USA, pp. 4662-466

Hurst, J.V., Chestnutt, J., Rizzi, A., 2004. Report on an actuator with mechanically adjustable series compliance," *Carnegie Mellon Univ., USA, CMU-RI-TR-04-24*

Inman, V.T., Ralston, H.J., Todd, F., 1981. *Human Walking*, Williams and Wilkins, Baltimore.

Jafari, A., Tsagarakis, N., Caldwell, D.G., 2011. AwAS-II: A new actuator with adjustable stiffness based on the novel principle of adaptable pivot point and variable lever ratio, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, China pp. 4638-4643

Jafari, A., Tsagarakis, N., Vanderborght, B., Caldwell, D., 2010. A novel actuator with adjustable stiffness (AwAS). *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4201-4206

Migliore, S.A., Brown, E.A., De Weerth, S.P., 2005. Biologically inspired joint stiffness control, *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Spain, pp. 4519-4524

Palmer, M., 2002. Sagittal plane characterization of normal human ankle function across a range of walking gait speeds, (Master's Thesis), Massachusetts Institute of Technology.

Prattand, G.A., Williamson, M., 1995. Series elastic actuators, *IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, USA, pp. 399-406

Quy, H.V., Aryananda, L., Sheikh, F.I., Casanova F., Pfeifer, R., 2011. *IEEE International Conference on Robotics and Automation Shanghai International Conference Center* May, Shanghai, China, pp. 9-13

Stramigioli, S., Oort, G.V., Dertien, E., 2008. A Concept for a New Energy Efficient Actuator. *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, China, pp. 2-5

Van Ham, R., Vanderborght, B., Van Damme, M., Verrelst, B., Lefeber, D., 2007. MACCEPA, the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator: Design and implementation in a biped robot. *Robot Autonom Syst.*, 55(10), pp. 761-768

Vanderborght, B., Albu-Schaeffer, A., Bicchi, A., Burdet, E., Cald-well, D., Carloni, R., Catalano, M., Ganesh, G., Garabini, M., Grioli, G., Haddadin, S., Jafari, A., Laffranchi, M., Lefeber, D., Petit, F., Strami-gioli, S., Grebenstein, M., Tsagarakis, N., Van Damme, M., Van Ham, R., Visser, L., Wolf, S., 2012. Variable impedance actuators: Moving the robots of tomorrow, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5454-5455

Wang, R., Huang, H., 2010. An Active-Passive Variable Stiffness Elastic Actuator for Safety Robot Systems., *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.18-22, Taiwan.

Tonietti, G., Schiavi, R. Bicchi, A., 2005. Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction. *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Spain, pp. 526-531

Wolfand, S., Hirzinger, G., 2008. A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, USA, pp. 1741-1746.