

LAZER SENSÖRLERLE BİR ROBOTUN DOĞAL FREKANSLARININ VE STATİK ÇÖKMELERİNİN ÖLÇÜMÜ

Zeki KIRAL
Murat AKDAĞ
Levent MALGACA
Hira KARAGÜLLE

ÖZET

Robotlar, farklı konumlarda farklı direngenliğe ve farklı doğal titreşim frekanslarına sahiptir. Robotların uç nokta hassasiyetinin yükseltilebilmesi için tasarım aşamasında statik çökmelerinin ve doğal frekanslarının belirlenmesi önemlidir. Burada robotun ağırlığı ve uzuvlarının direngenliği önemli tasarım parametreleridir. Bu çalışmada, yüksek hassasiyetli ve temassız lazer ölçüm sistemi kullanılarak, tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen SCARA tip bir robotun farklı konumları için uç nokta çökme ve doğal frekans ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılan sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Özellikle doğal frekans değerleri için deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum elde edilmiştir.

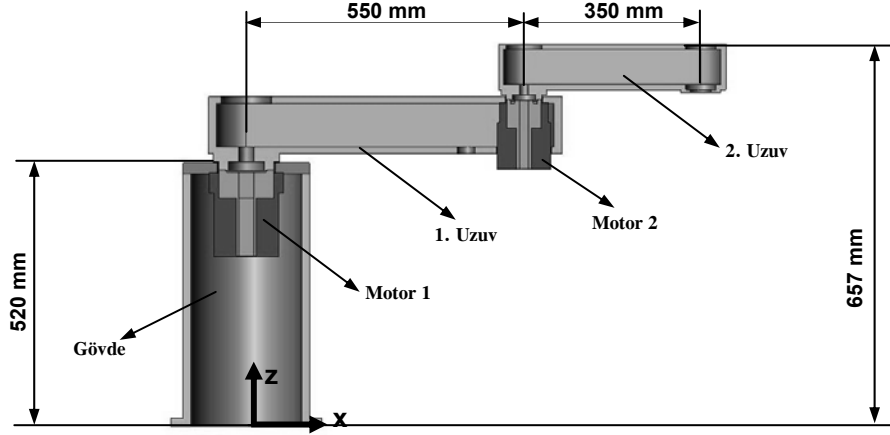
1. GİRİŞ

Farklı formlardaki robot manipülatörler endüstride uzun yıllardan beri hassas üretim ve montaj işlemlerinde kullanılmaktadırlar. Robotlar, başta otomotiv endüstrisi olmak üzere, yüksek hız ve tekrarlı hassasiyeti gerektiren işlemlerde, yüksek ilk yatırım maliyetlerine rağmen giderek artan kullanım oranlarına ulaşmaktadır. Tanımlanmış bir iş için robot seçiminde temel kriterler, robotun erişme mesafesi, en büyük çalışma yükü ve uç nokta hassasiyetidir. Robotlar, uzuv boyutları ve içerdikleri mafsallara bağlı olarak farklı çalışma uzaylarına sahiptirler. Bir robot, çalışma uzayı içerisindeki değişen konumları için farklı direngenliklere sahiptir [1] ve sabit bir çalışma yükü için, değişen uzuv konumlarında farklı uç nokta çökmeleri elde edilir. Bununla birlikte, robot çalışma uzayı içerisinde, oluşan uç nokta çökmelerinin gerçekleştirilen iş için izin verilebilir sınırlar içerisinde kalması gereklidir. Robot üreticileri, ürettikleri her bir robot için, ilgili robota ait çalışma uzayı içerisinde koordinatları tanımlanmış bir dizi noktada, robot için tanımlanmış çalışma yükü altında çökme değerlerini lazer mesafe ölçüm sistemi ile ölçmektedir. Robot uç noktasının yük altında bulunduğu nokta ile gerçekte olması gereken nokta arasındaki farklılıklar ölçüm ile tespit edilir ve mafsallara uygulanan ilave hareket girdileri ile ortadan kaldırılır. Bir dizi uç nokta konumu için elde edilen bu ilave hareket girdileri robot için bir kalibrasyon dosyası olarak robot kontrol yazılımı tarafından kullanılır [2].

Bu çalışmada, SCARA tip iki serbestlik dereceli bir robot için, uç nokta çökmeleri iki farklı konum ve farklı uç nokta yükleri için lazer yer değiştirme algılayıcısı ile ölçülmüştür. Ele alınan robot manipülatörüne ait sayısal analizler, ticari bir sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiş ve uç nokta çökme değerleri için elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, robota ait doğal frekanslar, iki farklı konum için lazer yer değiştirme algılayıcıları ile ölçülen darbe cevaplarından hareketle hesaplanmış ve sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

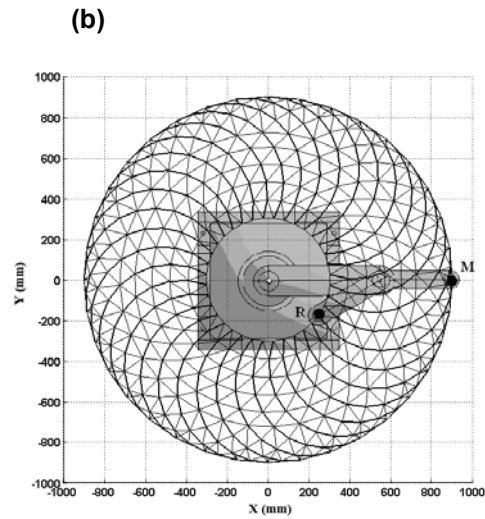
2. ROBOT MODELİ

Bu çalışmada ele alınan SCARA tip robota ait içyapı ve temel boyutlar Şekil 1'de verilmiştir. Ele alınan robot Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde tasarlanmış ve üretilmiştir ve DEU-S45-900 olarak adlandırılmıştır. Robotun en açık konumunda uzanma mesafesi 900 mm'dir ve uç nokta için maksimum çalışma yükü 45 kg'dır.



Şekil 1. DEU-S45-900 Robot Manipulatörü.

Üretimi gerçekleştirilen manipülatör Şekil 2a'da görüldüğü gibi rijit bir kaide üzerine monte edilmiştir. Manipülatör için elde edilen kinematik çalışma uzayı Şekil 2b'de gösterilmiştir. Kinematik çalışma uzayı robot uç noktasının ulaşabileceği noktaların sınırlarının belirtmektedir. İncelenen robot manipülatörü x-y düzleminde hareket edebilmektedir ve iki serbestlik derecesine sahiptir. Birinci uzuv için dönme serbestliği 360° iken ikinci uzuv için 150° dir. Şekil 2b'de gösterilen M konumu manipülatörün erişebileceği en dış noktayı, R konumu ise en iç noktayı temsil etmektedir. Çalışma kapsamında uç noktanın M ve R konumları için statik çökme ve doğal frekans analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. DEU-S45-900 Robot Manipulatörü ve Kinematik Çalışma Uzayı.

3. SAYISAL ANALİZLER

Ele alınan robot manipülatörüne ait statik ve doğal frekans analizleri ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [3]. Sonlu elemanlar yönteminde, incelenen yapı sınırlı sayıda alt elemana ayrılır ve kullanılan eleman tipi ve eleman sayısı tarafından belirlenen sayıdaki düğüm noktası ile temsil edilir. Bu çalışmada her bir düğümünde üç öteleme serbestliğine sahip dört düğümlü üçgen prizma elemanlar kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile incelenen yapıya ait sönümsüz dinamik davranış matris formunda Denklem (1) ile ifade edilir.

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = \{f\} \quad (1)$$

Burada M yapıya ait kütle matrisini, K yapıya ait direngenlik matrisini, \ddot{q} yapıyı temsil eden düğüm noktalarındaki ivme vektörünü, q ise bu düğüm noktalarındaki serbestliklere ait yer değiştirme vektörünü, f ise yapı üzerinde etkili olan dış zorlama vektörünü ifade etmektedir. Dış zorlamanın statik formda olması durumunda ivme vektörü sıfır olacağından, düğümlerdeki yer değiştirmeler

$$\{q\} = [K]^{-1}\{f\} \quad (2)$$

şeklinde hesaplanabilir. Denklem (2)'nin çözümü ile statik dış zorlama etkisinde yapının tümüne ait yer değiştirme dağılımı hesaplanabilir. Yapının serbest titreşimlerine ait frekansların belirlenmesi ise bir öz değer problemidir Denklem (3)'ün çözümü ile hesaplanabilirler.

$$[K]\{\phi\} = \omega^2[M]\{\phi\} \quad (3)$$

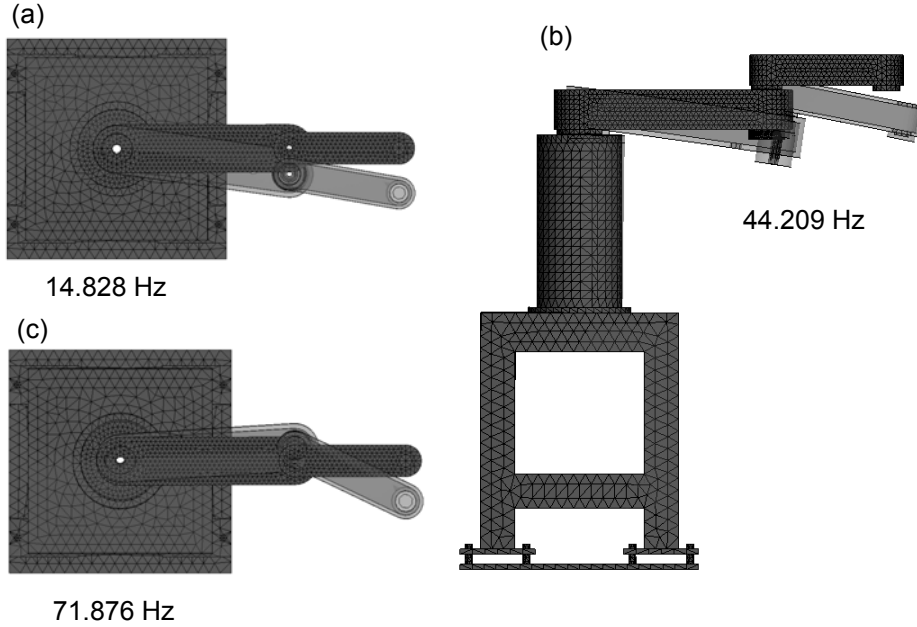
burada ω yapıya ait doğal frekans, Φ ise bu doğal frekansa ait titreşim biçimini ifade etmektedir.

İncelenen robot manipülatörünün 2 no'lu uzvunun farklı konumları için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen uç nokta çökmesi ve yapıya ait doğal frekans sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Manipülatör 2 Nolu Uzvunun Farklı Açısız Konumları İçin Uç Nokta Çökme ve Frekans Değerleri.

Konum (Teta2) (°)	Çökme (mm) (45 kg)	Çökme (mm) (Yüksüz)	Çökme (mm) (Fark)	f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)
0 (M)	-0.546888	-0.166665	-0.380223	14.828	44.209	71.876
15	-0.539932	-0.164425	-0.375507	14.876	44.285	71.030
30	-0.519958	-0.157922	-0.362036	15.029	44.539	69.190
45	-0.488192	-0.147566	-0.340626	15.272	44.896	66.763
60	-0.446834	-0.134117	-0.312717	15.620	45.345	64.763
75	-0.398805	-0.118539	-0.280266	16.019	45.695	63.105
90	-0.347312	-0.101851	-0.245461	16.500	46.210	62.477
105	-0.295902	-0.085207	-0.210694	16.994	46.717	62.046
120	-0.248303	-0.069738	-0.178564	17.476	47.620	61.769
135	-0.207645	-0.056490	-0.151154	17.901	48.832	61.049
150 (R)	-0.176726	-0.046391	-0.130335	18.234	50.520	59.889

Şekil 3'de robot manipülâtörünün sonlu elemanlar modeli ve M konumu için hesaplanan ilk üç doğal frekansına ait titreşim biçimleri görülmektedir. Titreşim biçimleri incelendiğinde manipülâtöre ait ilk doğal frekansın x-y düzleminde, ikinci doğal frekansın x-z düzleminde, üçüncü doğal frekansın ise yine x-y düzleminde olduğu görülmektedir. Benzer titreşim biçimleri iki no'lu uzvun farklı konumları için de elde edilmiştir.

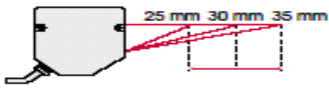
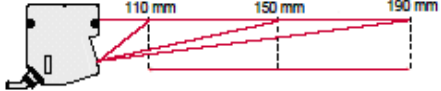


Şekil 3. M Konumu İçin Doğal Frekanslar a) Birinci Mod, b) İkinci Mod, c) Üçüncü Mod

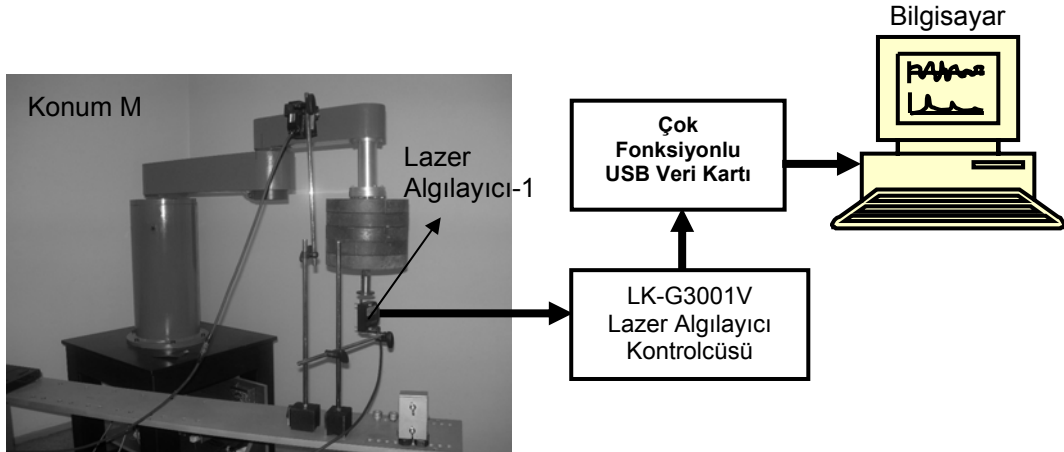
3. DENEYSEL ÇALIŞMA

DEU-S45-900 robot manipülâtörüne ait uç nokta çökmeleri ve doğal frekanslar yüksek hassasiyetli ve temassız ölçüm yapabilen iki adet lazer yer değiştirme algılayıcısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan lazer yer değiştirme algılayıcılarına ait ölçüm aralıkları ve ölçüm hassasiyetleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Lazer Yer Değiştirme Algılayıcılarının Özellikleri [4].

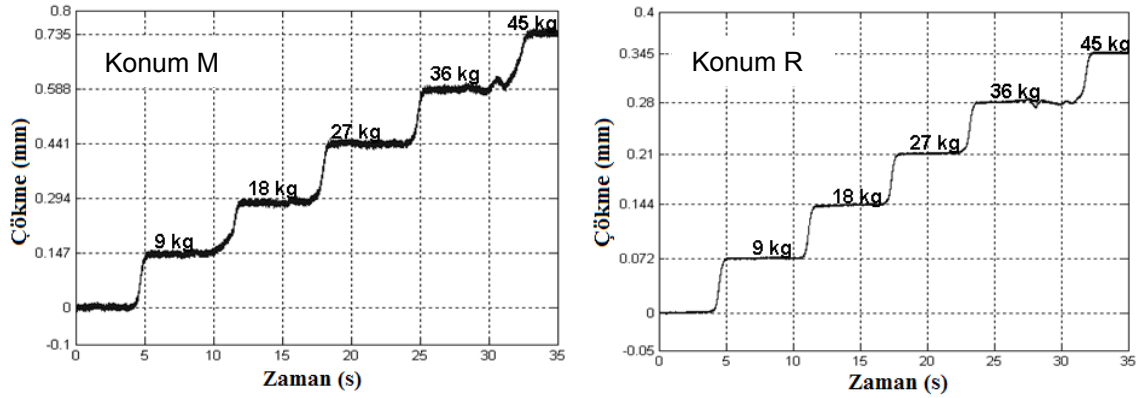
Özellik	Sensör Tipi	
	1. Algılayıcı (LK-G37)	2. Algılayıcı (LK-G157)
Ölçüm kapsama alanı	 30 ± 5 mm	 150 ± 40 mm
Hassasiyet	0.05 µm	0.5 µm
Spot boyutu	30x850 µm	120x1700 µm
Örnekleme periyodu	20/50/100/200/500/1000 µs (6 değerden biri seçilebilir)	

Lazer yer değiştirme algılayıcıları kullanılarak yapılan statik çökme ölçümlerinde uç nokta yükü kademeli olarak artırılmış ve bu sırada uç nokta çökmeleri kaydedilmiştir. Uç nokta statik çökme değerlerinin ölçümü için kullanılan deney düzeneği Şekil 4'de verilmiştir. Oluşturulan deney düzeneğinde, lazer yer değiştirme algılayıcılarından alınan gerilim sinyalleri lazer kontrolcüsüne aktarılmakta, kontrolcüden çıkan sinyaller ise çok kanallı bir USB veri toplayıcı kart üzerinden bilgisayara gönderilmektedir. Veri toplama işlemi için yazılan bir program aracılığı ile yer değiştirme değerleri milimetre olarak bilgisayara kayıt edilebilmektedir. Lazer algılayıcılar için örnekleme frekansı ve filtre seçimleri lazer kontrolcüye ait program aracılığı ile ayarlanabilmektedir.



Şekil 4. Robot Uç Noktası Statik Çökme Ölçümü Deney Düzeneği.

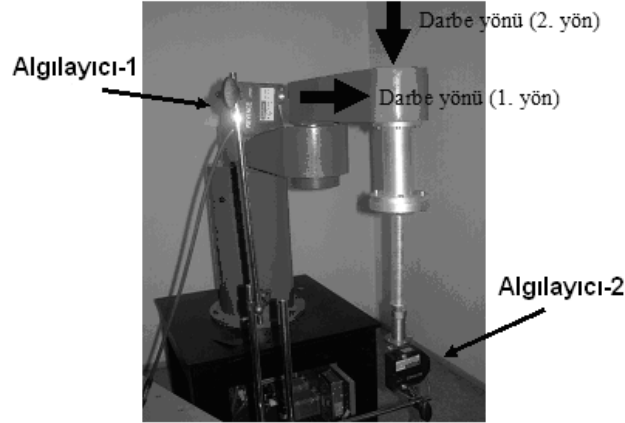
Şekil 4'de gösterilen deney düzeneği kullanılarak robotun M ve R konumları için yapılan statik çökme deneyleri sonuçları Şekil 5'de verilmiştir.



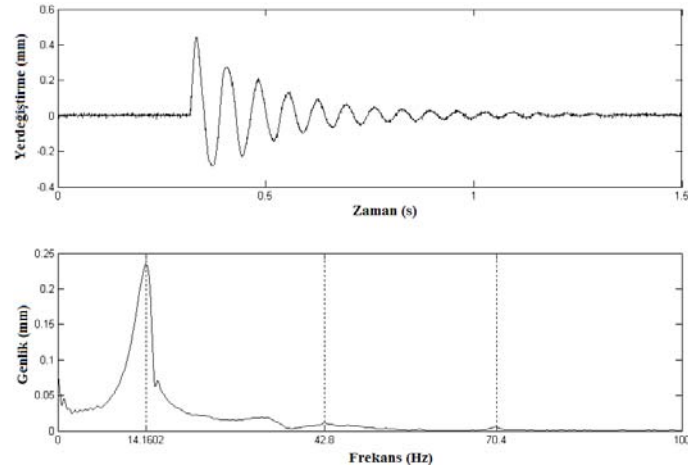
Şekil 5. M ve R Konumları İçin Robot Uç Nokta Çökme Değerleri.

Şekil 5'de farklı uç nokta yükleri için elde edilen uç nokta çökmeleri incelendiğinde, uç nokta yükü-uç nokta çökmesi ilişkisinin doğrusal olduğu gözlemlenebilir. Deneysel ölçümlerde robotun kendi ağırlığı ile oluşan uç nokta çökme değerleri referans olarak alınmış ve yüke bağlı ölçümler bu referansa göre yapılmıştır. Dolayısı ile Şekil 5'de verilen çökme değerleri uç nokta yükü etkisindeki deneysel çökme değerleridir. Elde edilen bu değerler Tablo 1'de M ve R konumları için elde edilen fark değerleri ile karşılaştırıldığında, sayısal ve deneysel çökme değerleri arasında önemli farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Oluşan bu farklılıklar gerçek model ile sonlu elemanlar modelindeki muhtemel farklılıklara bağlanabilir. Robot uç noktası için yapılan statik çökme ölçümlerinden sonra manipülatörün doğal titreşim frekansları darbe deneyi ile tespit edilmiştir. Bu amaçla, robot manipülatörü bir çekiç yardımı

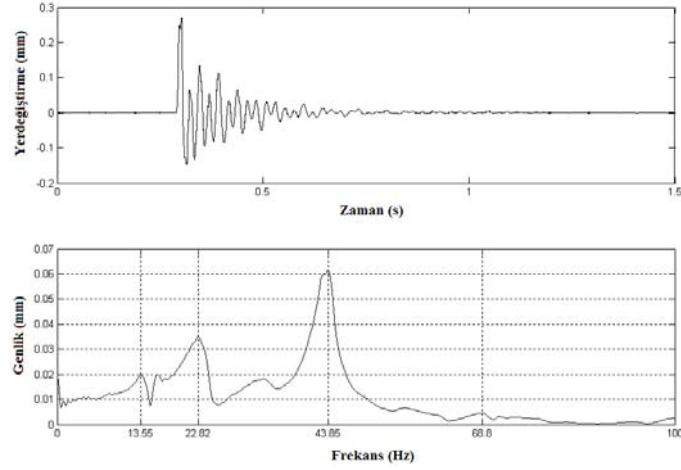
ile Şekil 6'da gösterilen yönlere sırası ile uyarılmış ve manipülâtörün serbest titreşim cevabı 1 ve 2 no'lu lazer algılayıcıları ile ölçülmüştür. Manipülâtörün darbe uyarısına verdiği cevaplar hızlı Fourier dönüşümü ile işlenmiş ve serbest titreşim cevaplarına ait frekans içerikleri belirlenmiştir. Robot manipülâtörünün M ve R konumları için x-y (1. yön) ve x-z (2. yön) düzlemlerinde etki ettirilen darbe zorlamasına karşılık elde edilen serbest titreşim cevapları ve bu cevaplara ait frekans içerikleri Şekil 7-10'da verilmiştir. M ve R konumları için elde edilen uç nokta statik çökme değerleri ve serbest titreşim frekans içeriklerinden elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 3'de verilmiştir.



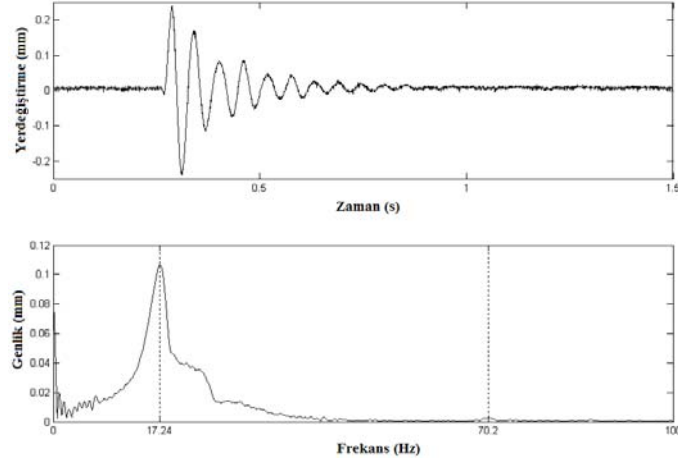
Şekil 6. M Konumu İçin Darbe Deneyi.



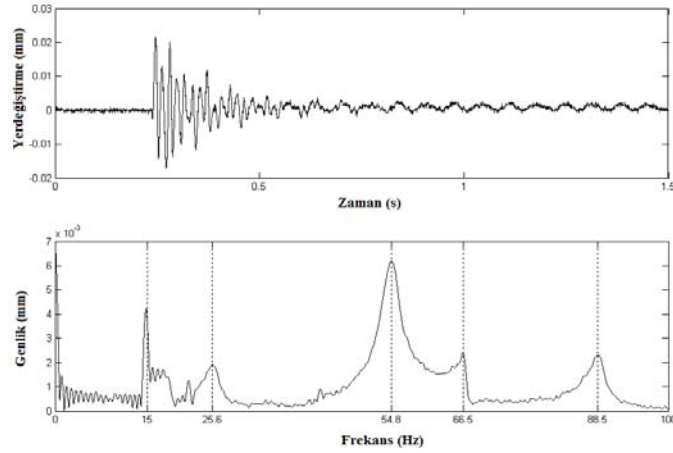
Şekil 7. M Konumu İçin Algilayıcı-1 İle Elde Edilen Serbest Titreşim Cevabı (1. yön) ve Frekans İçeriği.



Şekil 8. M Konumu İçin Algilayıcı-2 İle Elde Edilen Serbest Titreşim Cevabı (2. yön) ve Frekans İçeriği.



Şekil 9. R Konumu İçin Algilayıcı-1 İle Elde Edilen Serbest Titreşim Cevabı (1. yön) ve Frekans İçeriği.



Şekil 10. R Konumu İçin Algilayıcı-2 İle Elde Edilen Serbest Titreşim Cevabı (2. yön) ve Frekans İçeriği.

Tablo 3. Manipülatörün M ve R Konumları İçin Elde Edilen Sayısal ve Deneysel Sonuçlar.

Konum	Karşılaştırma Değeri	Sayısal Analiz	Deneysel
M	Statik çökme (mm)	0.380	0.735
	f ₁ (Hz)	14.828	14.160
	f ₂ (Hz)	44.209	43.850
	f ₃ (Hz)	71.876	70.040
R	Statik çökme (mm)	0.130	0.345
	f ₁ (Hz)	18.234	17.240
	f ₂ (Hz)	50.520	54.800
	f ₃ (Hz)	59.889	66.500

Tablo 3’de verilen değerler incelendiğinde, robot manipülatörünün M ve R konumları için elde edilen sayısal ve deneysel çökme değerleri arasında önemli farklılıklar olduğu gözlemlenmektedir. Bununla birlikte doğal frekans değerleri için sayısal ve deneysel sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum elde edilmiştir. Özellikle, robot manipülatörünün direngenliğinin daha düşük olduğu M konumu için elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar birbirine daha yakındır.

SONUÇ

Bu çalışmada, tasarımı ve üretimi Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde gerçekleştirilen SCARA tipi bir robot manipülatörüne ait uç nokta çökmeleri ve manipülatöre ait doğal frekanslar sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal, lazer yer değiştirme algılayıcıları aracılığı ile deneysel olarak belirlenmiştir. Robot manipülatörünün değişen konumları için farklı yapısal direngenliğe sahip olduğu, uç nokta çökmeleri ve doğal frekanslardaki değişimler aracılığı ile hem sayısal hem de deneysel olarak gösterilmiştir. Lazer yer değiştirme algılayıcıları ile yapılan uç nokta statik çökme ölçümlerinden elde edilen deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sayısal sonuçlar arasında önemli farklılıklar gözlemlenirken, robot manipülatörüne ait ilk üç doğal frekans değerinde sayısal ve deneysel sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmaya destek veren TÜBİTAK’a (Proje No: 104M373) teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] AKDAĞ, M. “Design and Analysis of Robot Manipulators by Integrated CAE Procedures”, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2008.
- [2] ABB Absolute accuracy paper, 2006. <http://www.jandmtech.com./PoonaAutomation>.
- [3] ABAQUS 6.5 Analiz kullanıcı kılavuzu, 2004.
- [4] Keyence LK-G serisi teknik veri sayfası, 2005. <http://www.keyence.co.uk/products/vision/laser/lkg>

ÖZGEÇMİŞLER

Zeki KIRAL

Şubat 1972'de Niğde'de doğdu. 1988 yılında İzmir Çınarlı Endüstri Meslek Lisesi'nden mezun oldu. 1992 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden Lisans, 1996 yılında DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nden Yüksek Lisans ve 2002 yılında Doktora derecelerini aldı. 1993–2002 yılları arasında aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak, Aralık 2002-Temmuz 2003 arasında da Öğretim Görevlisi olarak çalıştı. Halen Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Makina Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalında Yardımcı Doçent olarak görev yapmaktadır.

Murat AKDAĞ

1977 yılı Burdur doğumludur. 1995 yılında Ankara Yıldırım Bayezit Anadolu Lisesi'nden mezun olmuştur. 1999 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. 2002 yılında DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nden Yüksek Mühendis ve 2008 yılında da Doktor ünvanlarını almıştır. 2000 yılından beri Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Makina Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Levent MALGACA

1975 yılı İzmir doğumludur. 1992 yılında İzmir İnönü Lisesi'nden mezun olmuştur. 1997 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden Bölüm birincisi olarak bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 2001 yılında Yüksek Mühendis ve 2007 yılında Doktor ünvanını almıştır. 1997 yılından beri Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Makina Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Ölçme ve sinyal analizi, bilgisayar destekli tasarım/mühendislik, akıllı yapılar ve aktif titreşim kontrolü ilgi alanlarıdır. Evli ve bir oğlu vardır.

Hira KARAGÜLLE

1955 yılında Artvin'de doğdu. Ege Üniversitesi'nden 1977 de makina mühendisliği ve 1978 de yüksek mühendislik dereceleri aldı. 1984 te "Massachusetts Institute of Technology" den doktora derecesi aldı. 1985 te Dokuz Eylül Üniversitesi'nde göreve başladı. 1986 da doçent 1992 de profesör oldu. Darmstadt Teknik Üniversitesi ve Southampton Üniversitesi'nde misafir öğretim üyesi olarak bulundu. 1993–1998 de Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanlığı görevini yürüttü. Evli ve iki çocuk babası olup halen Dokuz Eylül Üniversitesi öğretim üyesidir.