



Çift Ankastre Kirişli, Manyetik Uç Kütleli Piezoelektrik Enerji Hasadı Sistemi Etkileşim Kuvveti Ölçümü

Umut Gür^{1*}, Sinan Başaran¹

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 11100 Merkez/BİLECİK

[*gurumut26@gmail.com](mailto:gurumut26@gmail.com), sinan.basaran@bilecik.edu.tr

Özet – Enerji hasadı, çevremizdeki çeşitli kaynaklardan, özellikle atıl durumda olan enerji biçimlerinden, küçük miktarlarda enerji toplama ve kullanma sürecidir. Bu süreç, çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji yönetimi anlayışının önemli bir parçasıdır. Enerji hasadı, güneş, rüzgâr, termal ve mekanik enerjiyi toplayarak, düşük güçlü elektronik cihazlardan büyük ölçekli enerji sistemlerine kadar geniş bir yelpazede enerjiyi kullanılabilir hale getirmektedir. Bu çalışmada ise birbirine dik iki adet manyetik uç kütleli bir enerji hasadı sistemi önerilerek bu sistem üzerinde yapılan çalışmalardan bir kısmı aktarılmıştır. Geleneksel tek veya daha fazla kirişli enerji hasadı sistemlerin aksine önerilen çalışmada tahrik kuvveti yönünden bağımsız enerji hasadı yapılması amaçlanmıştır. Yapılan çalışma için deneysel bir model oluşturulmuş olup sonlu elemanlar analizi ile doğrulanmıştır. Bu çalışma kapsamında ise sistemde giriş uçlarına yerleştirilmiş olan sabit mıknatısların etkileşim kuvvetlerinin tespiti sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilerek deneysel çalışma ile kıyaslanacaktır. Önerilen çalışmada genel olarak her kirişte manyetik olarak etkileşen titreşimlerden faydalanarak yön bağımsız bir enerji hasadını mümkün kılınmıştır. Gelecekte yapılacak çalışmalar ile sistemin kendi enerjisini sağlayabilecek çeşitli sensör uygulamalarında kullanılabilir olacaktır.

Anahtar Kelimeler – Piezoelektrik, Enerji hasadı, Manyetik kuvvet, Sonlu elemanlar analizi.

I. GİRİŞ

Günümüzde düşük güçlü elektronik cihazların ve kablosuz sensör ağlarının kullanımının artması, bu sistemlerin uzun süreli ve sürdürülebilir bir şekilde çalışabilmesi için alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artırmıştır. Geleneksel kimyasal pillerin sınırlı ömrü, bakım gereksinimi ve çevresel etkileri nedeniyle bu tür sistemlerde enerji ihtiyacını karşılamak için çevresel enerji kaynaklarının dönüştürülerek kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, çevrede yaygın olarak bulunan mekanik titreşimlerin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan piezoelektrik enerji hasat sistemleri önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir.

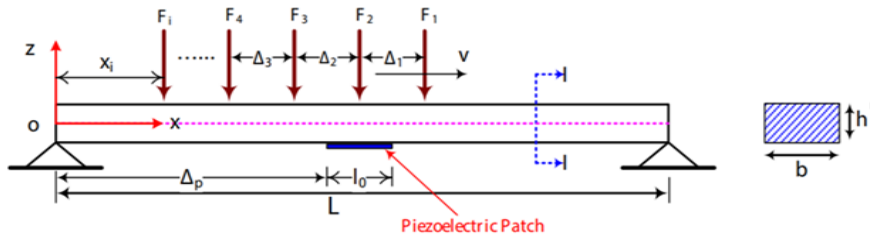
Enerji hasadı; titreşim, ısı, ışık, sıcaklık, hava akımı vb. gibi farklı enerji kaynaklarından elde edilen ve ortam enerjisini kullanıp elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından, özellikle mekanik titreşimlerden enerji hasadı, geleneksel pillerin yerini almak veya ömürlerini uzatmak için umut verici bir yöntem olarak değerlendirilmektedir [1]. Akıllı şehirler, akıllı ulaşım sistemleri ve akıllı izleme teknolojilerine olan talebin artmasıyla birlikte, kablosuz sensör ağları cazip bir hedef haline gelmiştir [2]. Titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla çeşitli titreşim enerjisi toplayıcıları tasarlanmıştır [3]. Enerji dönüşüm mekanizmaları arasında, basit yapıları, yüksek güç yoğunlukları ve verimlilikleri sayesinde piezoelektrik enerji toplayıcılar araştırmacıların yoğun ilgisini çekmiştir [4,5]. Güneş [6,7], rüzgâr [8–9], okyanus dalgaları [10,11] ve titreşim [12–13] enerjileri, küçük ölçekli enerji toplama için umut verici kaynaklar olarak geniş bir şekilde incelenmiştir. Günümüzde kablosuz sensör ağları, Nesnelerin İnterneti uygulamaları ve otonom sistemlerdeki gelişmeler, düşük güçlü ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu bağlamda, çevresel

titreşimlerden enerji toplayarak elektronik sistemleri beslemeye yönelik piezoelektrik enerji hasadı sistemleri büyük ilgi görmektedir. Piezoelektrik enerji toplayıcılar, basit yapıları ve yüksek güç yoğunlukları sayesinde öne çıkarken, düşük frekanslı ve geniş bantlı ortam koşullarında verimli çalışabilmeleri için yapısal yeniliklere ihtiyaç duymaktadır.

Bu bildiri çalışmasında, çift ankastre kirişten oluşan ve birbirine dik konumlandırılmış uç kısımlarda yer alan sabit mıknatıslar aracılığıyla manyetik olarak etkileşen yeni bir piezoelektrik enerji hasat sistemi sunulmaktadır. Önerilen yapı, yön bağımsız enerji toplama yeteneği ile geleneksel sistemlerden ayrılmakta ve manyetik bağlanma sayesinde, yalnızca bir kirişin uyarılması durumunda dahi her iki kirişten eşzamanlı enerji üretimi sağlamaktadır. Yapılan çalışma için deneysel bir model oluşturulmuş olup sonlu elemanlar analizi ile doğrulanmıştır. Bu çalışma kapsamında ise sistemde kiriş uçlarına yerleştirilmiş olan sabit mıknatısların etkileşim kuvvetlerinin tespiti sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilerek deneysel çalışma ile kıyaslanacaktır. Elde edilen sonuçlar, önerilen sistemin düşük güçlü elektronik cihazları besleyebilecek düzeyde enerji üretme kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymakta ve bu yapının gerçek dünya uygulamaları için güçlü bir aday olduğunu göstermektedir.

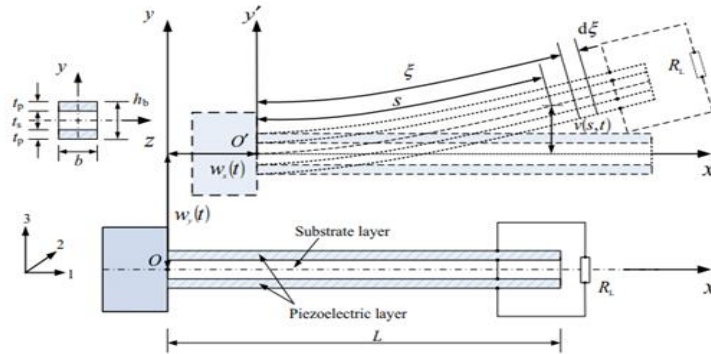
II. LİTERATÜR TARAMASI

Piezoelektrik ile ilgili yapılan bir çalışmada kiriş iki ucundan sabitlenmiş olup alt kısmına piezoelektrik malzeme yapıştırılmıştır (Şekil 1). Kiriş üzerine uygulanan kirişe dik yöndeki kuvvetler sayesinde piezoelektrik malzemeden enerji hasadı gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında kuvvetler kirişin farklı yönlerinde uygulanmıştır. Ayrıca kiriş kalınlıkları değiştirilerek kiriş kalınlığının elektrik üretimine etkisi grafiksel olarak gösterilmiştir. Açık bir şekilde kalınlığı azaltmanın daha çok enerji üretimi sağladığı gözlenmiştir [14].



Şekil 1. Kiriş üzerine uygulanan dik kuvvetler sayesinde gerçekleştirilen enerji hasadı.

Diğer bir yapılan çalışmada ise kiriş, bir alt tabaka ve iki piezoelektrik katmandan oluşmaktadır. Piezoelektrik katmanlar, R_L yük direncine bağlanmış ihmal edilebilir kalınlıkta iki düzlem elektrot tarafından sınırlanmıştır. Kiriş, uzunluğu L , genişliği b ve yüksekliği $h_b = t_s + 2t_p$ olan bir Euler-Bernoulli kirişi olarak ele alınırken, kesme deformasyonu ve dönme hareketi ihmal edilmektedir. Burada t_s alt tabaka kalınlığını, t_p ise her bir piezoelektrik katmanın kalınlığını ifade eder. O_{xy} 'yi moment alma koordinat sistemi olarak ayarlayarak, kirişin kelepçeli uç deplasmanları, sırasıyla yatay ve dikey yönde $w_x(t)$ ve $w_y(t)$ 'dir. O_{xy} , tabana sabitlenmiş koordinat sistemi olarak kabul edilir (tabanla birlikte hareket eder). Deney düzeneği aşağıdaki şema da (Şekil 2) belirtilmiştir [15].



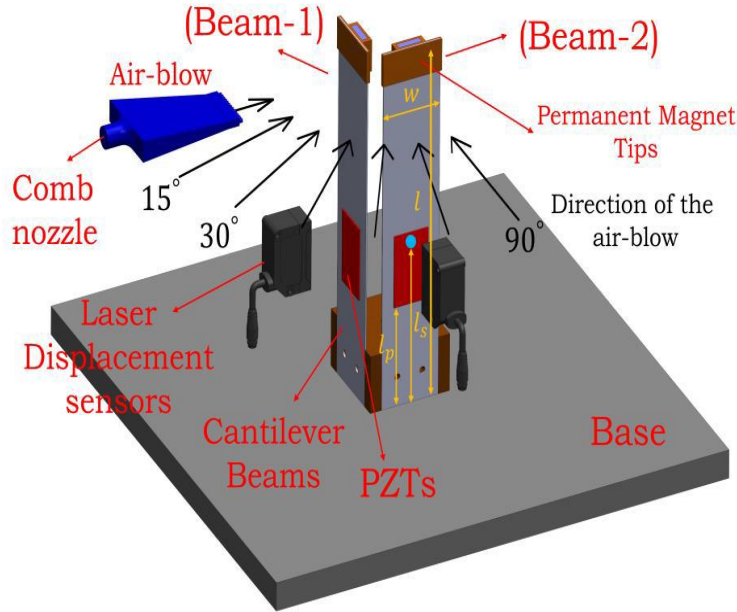
Şekil 2. Kiriş piezoelektrik yama enerji hasadı düzeneği.

Cottone ve arkadaşları [16] tarafından Gauss rastgele uyarı altında simetrik bir, iki kararlı piezoelektrik girişin stokastik yanıtı araştırılmıştır ve sonuçları, doğrusal olmayan iki kararlı toplayıcıların stokastik uyarı altında doğrusal olanlardan daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Erturk [17], Stanton ve arkadaşları [18], büyük genlikli periyodik salınımların titreşim enerjisini verimli bir şekilde toplamak için kullanılabilmesi manyetik bağlantılı bir yapı üzerinde incelemeler yapmışlardır. Zhou ve arkadaşları [19], döndürülebilir mıknatıslar kullanarak doğrusal olmayan enerji toplayıcıların geniş bant performans artırımı sağlamışlardır. Deneysel sonuçları, toplayıcıların düşük uyarı seviyelerinde yeterli seviyede voltaj üretilmediğini de göstermiştir. Cao ve arkadaşları [20], toplayıcıların dinamik yanıtları üzerindeki fraksiyonel sönümlenme, uyarı seviyesi ve uyarı frekansının etkisini analiz etmiştir. Düşük uyarı seviyelerine karşı enerji toplayıcılarının hassasiyetini artırmak amacıyla, Zhou ve arkadaşları [21] daha sığ potansiyel kuyulara sahip bir toplayıcıyı sayısal ve deneysel olarak incelemiş ve enerji toplayıcısının diğer yapılar ile karşılaştırıldığında daha pratik olduğunu göstermiştir [22].

Genel olarak bakıldığında piezoelektrik malzemeler kullanılarak birçok farklı enerji hasadı mekanizması literatürde incelendiği ve farklı çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada önerilen sistem ile birbirine göre dik konumlandırılmış ankastre girişler uç kütlelerinde yer alan sabit mıknatıslar yardımı ile yönden bağımsız tahrik kuvvetleri ile etkileşim halindedir.

III. ÖNERİLEN ENERJİ HASADI MEKANİZMASI

Önerilen piezoelektrik enerji hasat sisteminin performansını değerlendirmek amacıyla bir prototip oluşturulmuş ve çeşitli deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Deneyler Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Makine Mühendisliği kontrol sistemleri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde, her iki giriş üzerine piezoelektrik plakalar yerleştirilmiş ve sistemin titreşim yanıtları ile üretilen gerilim değerleri osiloskop ve veri toplama sistemleri aracılığıyla kaydedilmiştir.

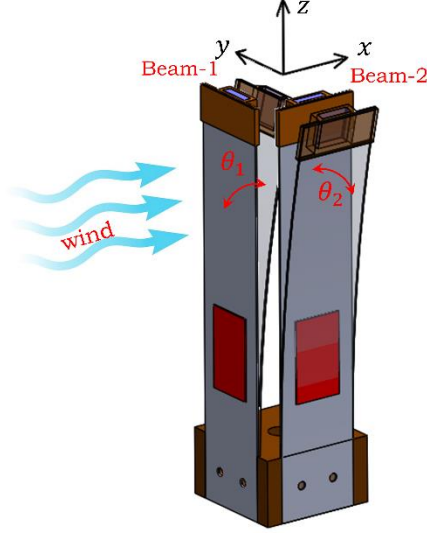


Şekil 3. Dikey manyetik bağlantılı çift girişli enerji toplama sisteminin şematik gösterimi.

Yapılan deneyler sırasında sadece bir girişin uyarıldığı durumlarda dahi yönden bağımsız şekilde, manyetik etkileşim sayesinde diğer girişinde etkileşip enerji ürettiği gözlemlenmiştir. Şekil 3'te bu çalışma kapsamında hazırlanan deneysel sistemin şematik gösterimi verilmektedir. Bu çalışmada girişlerin uç kısımlarında konumlandırılan sabit mıknatısların birbiri ile etkileşimi sonlu elemanlar analizi ile incelenmiş ve deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır.

Dikey manyetik kaplinli enerji hasadı sistemi incelenmiş olup sistemin şematik bir görsel Şekil 4'te verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi sistem hava akışıyla titreştirilerek yönden bağımsız bir şekilde enerji hasadını gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır. Bu sistem yön bağımsız olarak enerji toplamaya imkân sağlamaktadır. Burada görülebileceği üzere akış karşısında yer alan giriş direk olarak mekanik

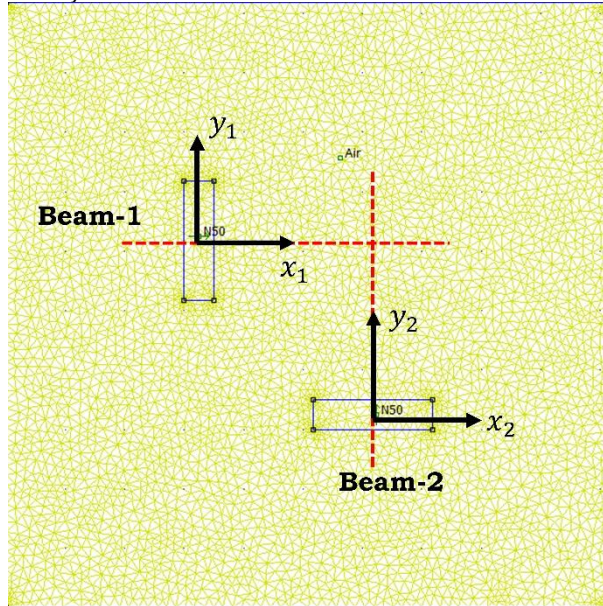
titreşimlere maruz kalmaktadır. Diğer kiriş ise akışa karşı yan bir pozisyonda kaldığı için direk bir titreşime uğraması söz konusu olmamaktadır. Kirişlerin uç kütlelerinde bulunan sabit mıknatıslar ise her iki kiriş bir etkileşime girerek aynı anda titreşmesine olanak tanımaktadır. Kirişlerin uç kısımlarında yer alan sabit mıknatısların sonlu elemanlar analizi ile etkileşiminden kaynaklanan kuvvet analizi bir sonraki bölümde aktarılmıştır. Ayrıca yapılan analiz çalışması deneysel olarak ölçülerek bir karşılaştırılma sunulmuştur.



Şekil 4. Kirişler üzerindeki yer değiştirme.

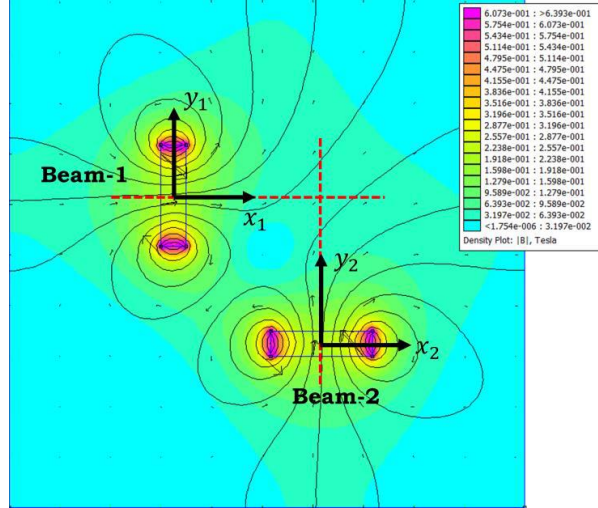
IV. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ YÖNTEMİ İLE MANYETİK ETKİLEŞİM KUVVETİNİN TESPİTİ

Bu çalışmada önerilen dikey manyetik bağlantılı çift kirişli piezoelektrik enerji hasat sisteminin mekanik davranışı ve elektriksel çıktısı, detaylı bir Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile incelenmiştir. Sistem geometrisi, piezoelektrik elemanların yerleşimi ve manyetik etkileşim bölgeleri dikkate alınarak bir model oluşturulmuştur. Çalışmada ücretsiz lisansa sahip Finite Element Method Magnetics (FEMM) yazılımı kullanılmıştır. İki boyutlu olarak gerçekleştirilen analiz için oluşturulan ağ (mesh) yapısı ve malzeme tanımı Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5. İki boyutlu analiz için oluşturulan ağ yapısı.

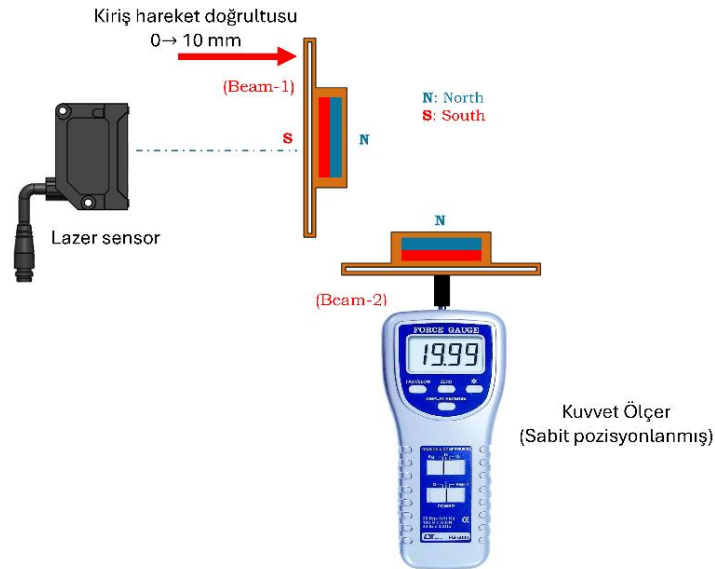
Bu analiz kapsamında kiriş-1 olarak adlandırılan kiriş üzerinde yer alan $20 \times 20 \times 5$ mm boyutundaki sabit mıknatıs 10 mm hareket ettirilerek $(x_1, y_1) = (0,0)$ mm pozisyonundan $(x_1, y_1) = (10,0)$ mm pozisyonuna hareket ettirilerek analiz tekrarlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Burada 10 mm hareket sonucunda ise kiriş-2 olarak adlandırılan kiriş üzerindeki sabit mıknatıs üzerine etki eden kuvvet ölçümü y_2 doğrultusu için gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da kiriş-1 için $(x_1, y_1) = (0,0)$ mm pozisyonu için elde edilen manyetik akı yoğunluğu sunulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kuvvet ölçümleri ayrıca deneysel sistem üzerinde bir lazer sensör ve kuvvet ölçüm cihazı ile deneysel olarak karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. Önerilen sistemin manyetik Sonlu Elemanlar Yöntemi analizi.

A. Deneysel Kuvvet Ölçümü

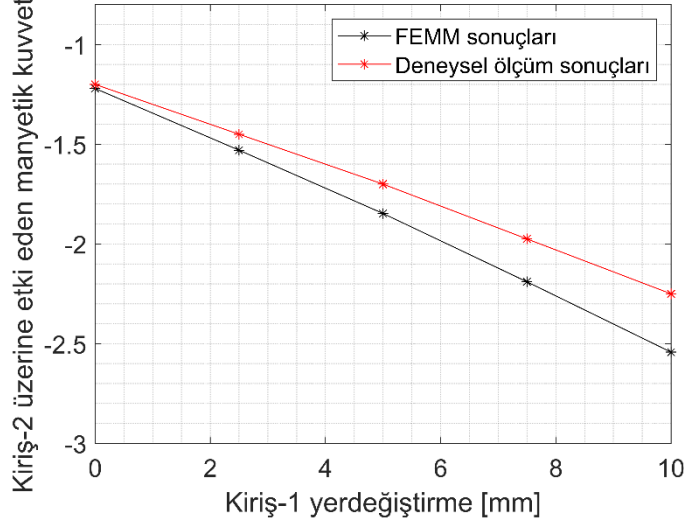
Yapılan sonlu elemanlar analizinin doğrulanması adına deneysel enerji hasadı sistemi üzerinde kuvvet ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de kuvvet ölçümü için yapılan deneysel çalışma düzeni şematik olarak sunulmuştur. Burada kiriş-1 harici bir kuvvet yardımı Şekil 7 üzerinden de görüleceği üzere ileri yöne doğru hareket ettirilmiş ve uç kısmına yerleştirilen sabit mıknatısın $0-10$ mm hareketi bir lazer sensör yardımı ile ölçülmüştür. Kiriş-2 ise Lutron FG-5020 kuvvet sensörü yardımı ile sabit bir şekilde konumlandırılarak kiriş-1'in hareketi sonucunda üzerine etki eden kuvvet ölçümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7. Deneysel kuvvet ölçümü için kullanılan düzeneğin şematik görünüşü.

Şekil 8'de elde edilen sonlu elemanlar analizi sonuçları ile deneysel çalışma kapsamında ölçülen manyetik kuvvet karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Grafik üzerinde siyah renk ile verilen eğri sonlu

elemanlar yöntemi ile 0-10 mm kiriş-1'in hareketi sonucunda kiriş-2 üzerine etki eden kuvveti gösterirken kırmızı renk ile verilen eğri ise deneysel ölçüm ile elde edilen kiriş-2 üzerine etki eden y_2 doğrultusundaki kuvveti vermektedir. Şekilde görüleceği üzere deneysel ölçüm ile sonlu elemanlar yöntemi arasındaki kuvvet farkı kiriş-1'in yerdeğiştirme miktarı arttıkça artmaktadır. Buradaki fark pratikte kullanılan sabit mıknatısın fiziksel özelliklerinin sonlu elemanlar yönteminde kullanılan sabit mıknatıs malzemesi tanımındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Fakat genel eğilim olarak her iki kuvvet ölçümü de benzer karakteristiği yansıtmaktadır.



Şekil 8. Kiriş-2 üzerinde etki eden manyetik kuvvet sonuçları.

Bu analizde gözlemlendiği üzere, Kiriş-1 $(x_1, y_1) = (0,0)$ konumda sabit kalsa bile, doğuştan gelen manyetik kuvvetler nedeniyle iki kiriş arasında hâlâ hafif bir etkileşim mevcuttur. Kiriş-1'in hareketi, Kiriş-2 üzerinde etki eden manyetik kuvveti değiştirerek sürekli dinamik etkileşimlere yol açar. Sonuç olarak, dış uyarımın hangi yönden geldiğine bakılmaksızın, her iki kiriş de sürekli titreşim durumunda kalır.

Sonuç olarak önerilen birbirine göre dik konumlandırılmış çift kirişli manyetik uç kütleli enerji hasadı sistemi kirişlerden biri üzerine etki eden mekanik titreşimleri sistemin sahip olduğu manyetik kuvvet etkileşimi ile diğer kirişe de aktarabilecek yapıdadır. Bu konseptte yönden bağımsız olarak sistem üzerine etki eden harici rüzgâr yükleri sayesinde yenilikçi bir enerji hasadı mekanizması elde edilmesine olanak tanımaktadır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışma, çevresel titreşimlerden yön bağımsız enerji elde etmeyi amaçlayan, dikey manyetik bağlantıya sahip çift konsol kirişli yeni bir piezoelektrik enerji hasat sisteminin tasarımını ve deneysel doğrulamasını kapsamaktadır. Sistem, yalnızca bir kirişin uyarılması durumunda dahi manyetik bağlama sayesinde her iki kirişten eşzamanlı enerji üretimini mümkün kılmaktadır. Bu bildiri çalışması kapsamında kirişlerin sahip olduğu sabit mıknatıslı uç kütlelerin etkileşimi sonlu elemanlar analizi yardımı ile doğrulanmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar deneysel sistem üzerinden gerçekleştirilen kuvvet ölçümü ile kıyaslanmıştır. Sistemin dinamik davranışını anlamak için yapılan sonlu elemanlar manyetik analizleri ile deneysel sonuçların örtüştüğü çalışma kapsamında gösterilmiştir. Geliştirilen yapı, özellikle çok yönlü ve düzensiz titreşim kaynaklarının bulunduğu ortamlarda kullanılabilir, verimli ve sürdürülebilir bir enerji çözümü olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Siddique, A. R. M., Mahmud, S., & Van Heyst, B. (2015). A comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms. *Energy Conversion and Management*, 106, 728-747.

- [2] Zuo, J., Dong, L., Yang, F., Guo, Z., Wang, T., & Zuo, L. (2023). Energy harvesting solutions for railway transportation: A comprehensive review. *Renewable Energy*, 202, 56-87.
- [3] Saadon, S., & Sidek, O. (2011). A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters. *Energy conversion and management*, 52(1), 500-504.
- [4] Wu, N., Bao, B., & Wang, Q. (2021). Review on engineering structural designs for efficient piezoelectric energy harvesting to obtain high power output. *Engineering Structures*, 235, 112068.
- [5] Li, Z., Peng, X., Hu, G., & Peng, Y. (2022). Theoretical, numerical, and experimental studies of a frequency up-conversion piezoelectric energy harvester. *International Journal of Mechanical Sciences*, 223, 107299.
- [6] Raghunathan, V., Kansal, A., Hsu, J., Friedman, J., & Srivastava, M. (2005, April). Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems. In *IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 2005. (pp. 457-462). IEEE.
- [7] Brunelli, D., Moser, C., Thiele, L., & Benini, L. (2009). Design of a solar-harvesting circuit for batteryless embedded systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 56(11), 2519-2528.
- [8] Zheng, X., He, L., Wang, S., Liu, X., Liu, R., & Cheng, G. (2023). A review of piezoelectric energy harvesters for harvesting wind energy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 352, 114190.
- [9] Wen, Q., He, X., Lu, Z., Streiter, R., & Otto, T. (2021). A comprehensive review of miniaturized wind energy harvesters. *Nano Materials Science*, 3(2), 170-185.
- [10] Khan, T. A., Alkhateeb, A., & Heath, R. W. (2016). Millimeter wave energy harvesting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(9), 6048-6062.
- [11] Collins, I., Hossain, M., Dettmer, W., & Masters, I. (2021). Flexible membrane structures for wave energy harvesting: A review of the developments, materials and computational modelling approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111478.
- [12] Tran, N., Ghayesh, M. H., & Arjomandi, M. (2018). Ambient vibration energy harvesters: A review on nonlinear techniques for performance enhancement. *International Journal of Engineering Science*, 127, 162-185.
- [13] Mohanty, A., Parida, S., Behera, R. K., & Roy, T. (2019). Vibration energy harvesting: A review. *Journal of Advanced Dielectrics*, 9(04), 1930001.
- [14] Amini, Y., Heshmati, M., Fatehi, P., & Habibi, S. E. (2017). Piezoelectric energy harvesting from vibrations of a beam subjected to multi-moving loads. *Applied Mathematical Modelling*, 49, 1-16.
- [15] Fang, F., Xia, G., & Wang, J. (2018). Nonlinear dynamic analysis of cantilevered piezoelectric energy harvesters under simultaneous parametric and external excitations. *Acta Mechanica Sinica*, 34, 561-577.
- [16] Cottone, F., Vocca, H., & Gammaitoni, L. (2009). Nonlinear energy harvesting. *Physical review letters*, 102(8), 080601.
- [17] Erturk, A., & Inman, D. J. (2011). Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable Duffing oscillator with electromechanical coupling. *Journal of Sound and Vibration*, 330(10), 2339-2353.
- [18] Stanton, S. C., McGehee, C. C., & Mann, B. P. (2010). Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: Investigation of a bistable piezoelectric inertial generator. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 239(10), 640-653.
- [19] Zhou, S., Cao, J., Erturk, A., & Lin, J. (2013). Enhanced broadband piezoelectric energy harvesting using rotatable magnets. *Applied physics letters*, 102(17).
- [20] Cao, J., Zhou, S., Inman, D. J., & Chen, Y. (2015). Chaos in the fractionally damped broadband piezoelectric energy generator. *Nonlinear Dynamics*, 80(4), 1705-1719.
- [21] Zhou, S., Cao, J., Inman, D. J., Lin, J., Liu, S., & Wang, Z. (2014). Broadband tristable energy harvester: modeling and experiment verification. *Applied Energy*, 133, 33-39.
- [22] Zhou, S., Cao, J., Wang, W., Liu, S., & Lin, J. (2015). Modeling and experimental verification of doubly nonlinear magnet-coupled piezoelectric energy harvesting from ambient vibration. *Smart Materials and Structures*, 24(5), 055008.