



TÜBİTAK

TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA KURUMU
THE SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

2008-1082
Bh

Elektrik, Elektronik ve Enformatik Araştırma Grubu
Electrical, Electronical and Informatics Research Group

108189

MEMS TABANLI ENERJİ ÜRETİMİ

Proje No: 104E119

Y. Doç. Dr. Haluk KÜLAH

Prof. Dr. Tayfun AKIN

AĞUSTOS 2008

ANKARA

ÖNSÖZ

Son dönemlerde gitgide popüler olan MEMS teknolojisi sayesinde yüksek performanslı algılayıcılar (nem, sıcaklık, basınç, sarsıntı v.s. algılayıcıları) gayet düşük maliyetlerle üretilebilmekte ve bir yonga alanına birden fazla algılayıcı yerleştirilebilmektedir. Bu algılayıcıların silisyum üzerinde geliştirilmesi de CMOS elektronik devrelerle bütünleştirilmelerini sağlayarak karmaşık işleme devreleri ile beraber çalışmalarını mümkün kılmakta, başka bir deyişle akıllı algılayıcı sistemlerinin (smart sensor systems) yapılmasına imkan vermektedir. MEMS'in yanı sıra gelişen kablosuz iletişim (Wireless Networking) teknolojisi de bu algılayıcıların dış dünya ile iletişimlerini kolaylaştırmakta ve kablosuz çalışmalarına izin vererek başta çevresel gözlem olmak üzere pek çok askeri ve sivil uygulamada yeni kullanım alanları yaratmaktadır. Bunun yanı sıra, MEMS teknolojisiyle beraber günlük hayatımızda kullandığımız birçok elektronik cihaz (cep telefonları, avuç içi bilgisayarlar, müzik çalarlar, vs.) artık daha küçük boyutlarda üretilebilmekte ve çalışmak için daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Ancak bu sistemlerin çalışması için gerekli olan enerjinin sağlanması sistem performansını sınırlayan önemli bir faktör olarak sorun yaratmaktadır. Örnek olarak bugün bir cep telefonu bataryası, cep telefonunun toplam hacim ve ağırlığının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. *TÜBİTAK Elektrik, Elektronik ve Enformatik Araştırma Grubu (EEEAG)* tarafından *104E119* numaralı proje kapsamında desteklenen araştırma projemizin çözüm önerisi MEMS teknolojisini kullanarak **çevresel sarsıntıdan elektromanyetik indüksiyon yöntemi ile elektrik enerjisi üreten mikroçipler** geliştirmektir. Proje süresince dört farklı üreteç modellenmiş, tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	1
İÇİNDEKİLER.....	2
ŞEKİLLER LİSTESİ	3
TABLolar LİSTESİ	6
ÖZET	7
ABSTRACT.....	8
GİRİŞ	9
GENEL BİLGİLER.....	12
1. TEORİ ve LİTERATÜR ÖZETİ	12
Çevresel Kaynaklardan Enerji Üretim Yöntemleri.....	12
Çevresel Titreşimden Enerji Toplayıcılar.....	12
Elektrostatik (Kapasitif) Enerji Toplayıcılar	13
Piezoelektrik Enerji Toplayıcıları	14
Elektromanyetik (İndüktif) Enerji Toplayıcıları	15
2. ÇALIŞMANIN KAPSAMI	16
GEREÇ VE YÖNTEM	18
Matematiksel Modelleme.....	18
Tek Rezonans Kol İçin Üretilen Gücün Optimizasyonu	36
Frekans Çevirimi Yöntemi ve Matematiksel Modellemesi	39
Mikro Jeneratör Yapılarının Optimizasyonu ve Üretimi	47
Mikro Jeneratörlerin Üretim Aşamaları	52
Üreteçlerin Testleri	57
SONUÇ VE BULGULAR	Error! Bookmark not defined.
REFERANSLAR:.....	83
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU	85

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Mikropiller (Seiko Instruments Inc.) ve bir yakıt hücresi (Fraunhofer ISE).	10
Şekil 2. Termal ısı farkından enerji üretimi prensibi ile çalışan pilsiz bir kol saati	10
Şekil 3. Bir elektromanyetik jeneratörde üretilen gücün sarsıntı frekansına göre değişimi	11
Şekil 4 Elektrostatik enerji toplayıcısının mekanik yapısı [9].	14
Şekil 5. Piezoelektrik enerji toplayıcısının mekanik yapısı [16].	15
Şekil 6. Elektromanyetik enerji toplayıcısının mekanik yapısı [22].	16
Şekil 7. Seri rezonans kol yapısı ve eşdeğer mekanik modeli	19
Şekil 8. Üretilen Gücün Frekans Oranına Bağlı Değişimi, $r = \omega/\omega_n$	30
Şekil 9. Güç vs. frekans oranı, $q = \omega_n/\omega$	31
Şekil 10. Gücün girdi ve doğal frekanslara bağlı 3-Boyutlu değişim grafiği @ $\zeta_{eq} = 0.2$	32
Şekil 11. Gücün girdi ve doğal frekanslara bağlı 3-Boyutlu değişim grafiği @ $\zeta_{eq} = 0.2$	32
Şekil 12. Gücün girdi ve doğal frekanslara bağlı 3-Boyutlu değişim grafiği @ $\zeta_{eq} = 0.2$	32
Şekil 13. Yer değişim oranının frekans oranına bağlı değişimi.	34
Şekil 14. 3D Güç vs ζ_e ve ζ_m	35
Şekil 15. Optimizasyonda kullanılan sistem parametreleri.....	37
Şekil 16. Optimize edilmiş güç değerlerinin frekansa bağlı değişim grafiği	39
Şekil 17. Frekans çevirimi yönteminde kullanılan mekanik yapı.....	40
Şekil 18. Alt rezonans kolların yakından görünümü.....	40
Şekil 19. Eşdeğer mekanik model	41
Şekil 20. Frekans çevrimi tekniği için simulink modeli	45
Şekil 21. Kol ve diyaframın birbirlerine göre hareketlerini inceleyen simulasyon sonuçları	45
Şekil 22. Frekans çevrimi tekniğiyle elde edilebilecek voltaj çıktısı	46
Şekil 23. Seri Rezonans Kol Tasarımının Şematik Gösterimi	47
Şekil 24. Geniş bantta enerji üretebilen seri Rezonans Kol Tasarımının Şematik Gösterimi	48
Şekil 25. Büyük Kütle-Sarım Tasarımının Şematik Gösterimi	49
Şekil 26. Frekans Çevirimi Yönteminin Şematik Gösterimi	50
Şekil 27. Serimi Tamamlanan Modellerin Üretim Aşamaları	53

Şekil 28. Tek frekansta etkin enerji üreten seri kol tasarımının serimi.....	54
Şekil 29. Geniş frekans bandında etkin enerji üreten seri kol tasarımının serimi	54
Şekil 30. Büyük kütle-sarım yapısının serimi.....	55
Şekil 31. Frekans çevirim tekniğine dayalı üreticinin serimi	55
Şekil 32. Tek frekansta etkin enerji üreten seri kol tasarımı.....	56
Şekil 33. Geniş bant frekansında etkin enerji üreten seri kol tasarımı	56
Şekil 34. Büyük kütle sarım yapısı	57
Şekil 35. Frekans çevirim tekniğine dayalı enerji üretici.....	57
Şekil 36. Test Düzeneği	58
Şekil 37. Seri kol yapısının testler için hazırlanmış prototipi	58
Şekil 38. Seri kol yapısının testleri için hazırlanmış düzenek	59
Şekil 39. Seri bağlı dört koldan elde edilen voltaj çıktısı.....	61
Şekil 40. Seri kollardaki faz açısı değişiminin frekansa bağlı değişimi.	62
Şekil 41. Tek bir koldan ve seri bağlı beş koldan alınan voltaj çıktısı.	62
Şekil 42. Tek bir koldan ve seri bağlı beş koldan alınan voltaj çıktısı.	63
Şekil 43. Üretim sonrası temizleme öncesi ısıtılabilir yağ kalıntılı yapılar.....	64
Şekil 44. Geniş bantta çalışan seri kol yapısının testler için hazırlanmış prototipi	64
Şekil 45. Tek bir koldan ve seri 20 koldan alınan voltaj çıktısı.	65
Şekil 46. Üretilen mikro enerji üreticinin frekans sensörü olarak tasarlanmış düzeneği.	66
Şekil 47. Frekans sensörünün ölçüm sonuçları.	67
Şekil 48. Frekans sensörünün frekans aralığına göre hatası.....	67
Şekil 49. Büyük kütle-sarım yapısı.....	68
Şekil 50. Büyük kütle-sarım yapısından elde edilen çıktı voltajı.	69
Şekil 51. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üretici yapısı.....	69
Şekil 52. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üretici için test düzeneği.	70
Şekil 53. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üretici için test düzeneği.	70
Şekil 54. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üreticinde elde edilen voltaj çıktısının benzetim sonuçları ile birlikte gösterimi.....	71

Şekil 55. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üreticinde elde edilen voltaj çıktısının benzetim sonuçları ile birlikte gösterimi.....	72
Şekil 56. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üreticinde elde edilen voltaj çıktısının benzetim sonuçları ile birlikte gösterimi.....	72
Şekil 57. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üreticinin farklı girdi salınımı frekanslarında elde edilen voltaj çıktısının benzetim sonuçları ile birlikte gösterimi.	74
Şekil 58. Sarsıntı frekansının kol bırakma ve yakalama noktası üzerine etkisi.	74
Şekil 59. Sarsıntı frekansının üretilen voltaj üzerine etkisi.	75
Şekil 60. Frekans çevirim tekniğiyle seri bağlı birden fazla koldan elde edilen gerilim.	76
Şekil 61. Frekans çevirim tekniğiyle seri bağlı birden fazla koldan elde edilen gerilim.	76
Şekil 62. Faz ve doğal frekans farkının az görüldüğü örneklerin test sonuçları.	77
Şekil 63. Hizalama hatalarının kol yakalanma ve bırakılma mesafesine etkisi.	78

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. Çeşitli Enerji Kaynakların Enerji Seviyeleri [5]	13
Tablo 2. Parylene malzeme için optimizasyon sonuçları	38
Tablo 3. Benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen parametreler	44
Tablo 4. Seri Rezonans Kol Tasarımının Önemli Parametreleri	48
Tablo 5. Seri Rezonans Kol Tasarımının Önemli Parametreleri	49
Tablo 6. Büyük Kütle Sarım Tasarımının Önemli Parametreleri	50
Tablo 7. Frekans Çevrimi Yöntemi Tasarımının Detayları	51
Tablo 8. Test ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	60
Tablo 9. Test ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	66
Tablo 10. Test ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	68
Tablo 11. Test ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	71
Tablo 12. Büyük-kütle sarım ve frekans çevirim tekniklerinin sonuçlarının karşılaştırılması	73
Tablo 13. Geliştirilen üreticinin literatürde sunulmuş olan benzerleri ile karşılaştırılması	73

ÖZET

Bu araştırma projesinin amacı MEMS teknolojisi kullanarak mikroişlenmiş sistemler ve entegre devreler için gerekli güç üretimini sağlayacak çip tasarlamaktır. Güç üretiminin herhangi bir ekstra kaynak kullanılmadan, sadece ortamda var olan sarsıntının elektrik enerjisine çevrimi ile elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede uzun ömürlü, kendi başına çalışabilen kablosuz duyurga sistemlerinin geliştirilmesi mümkün olacaktır. Bu çalışmada dört farklı tasarım geliştirilmiştir:

- İlk tasarım parylene malzemesinden yapılmış, metal sarımlar taşıyan ve sabit bir mıknatısa göre hareket edebilen 20 adet rezonans koldan oluşmaktadır. Her bir koldan, 3.45 kHz'lik bir titreşim frekansında, 0.67 mV'luk voltaj ve 56 pW'lık güç üretilebildiği gösterilmiştir.
- İkinci tasarımda farklı uzunlukta rezonans kollar kullanılarak bant genişliğinin artırılması hedeflenmiştir. Yapılan testlerle, bant genişliğinin 1000 Hz'e kadar artırılacağı ve 9 mV'luk sabit voltaj ve 1.7 nW'lık sabit güç elde edilebileceği gösterilmiştir.
- Üçüncü tasarım olarak literatürde sıkça kullanılan büyük kütle sarım jeneratörü önerilen yeni yapılarla bir kıyaslama sağlayabilmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu jeneratör üzerinde metal sarım bulunan sabit bu tasarımdan, 113 Hz'lik titreşim frekansında, 0.3 mV'luk voltaj ve 40 pW'lık güç elde etmek mümkündür.
- Geliştirilen son tasarım ise 1-100 Hz aralığındaki titreşimleri, 2-3 kHz aralığına taşıyarak enerji çevirim verimliliğini arttırmaktadır. Literatürde ilk kez önerilen bu yapı iki parçadan oluşmaktadır: diyafram-mıknatıs yapısı ve bunun hemen altında, üzerinde seri olarak bağlanmış sarımlar bulunan 20 adet rezonans kolları. Diyafram çevresel titreşimlerle salınmakta ve ucunda nikel (Ni) bulunan kolları yakalayıp bırakmakta ve frekans çevrimini sağlamaktadır. 113 Hz'lik çevresel titreşim frekansında, her bir koldan 0.57 mV'luk voltaj ve 0.25 nW'lık güç elde edilebildiği gösterilmiştir.

Projede elde edilen sonuçların bir kısmı MEMS alanındaki en saygın konferanslardan sayılan uluslararası **IEEE Sensors, Power MEMS, Transducers 2007** ve **IEEE Prime 2008** konferanslarında sunulmuştur. Ayrıca, uluslararası **Sensors and Actuators A** dergisinde bir makale yayımlanmıştır. Bunların dışında bir uluslararası konferans bildirisi ve iki uluslararası dergi makalesi de değerlendirilme aşamasındadır. Proje kapsamında **bir doktora tezi** tamamlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Micro güç üreteçleri, Enerji toplama, Frekans çevirimi, MikroElektroMekanik Sistemler (MEMS).

ABSTRACT

The goal of this research project is to develop MEMS-based micro energy generators to power up microsystems and microelectronic chips. In powering up these systems, vibration energy available in the environment is used instead of any external power supply. By this way, it will be possible to implement self-powered, long life-time, wireless microsensor arrays. Four different power generators have been developed in the scope of this study:

- The first type of generator is composed of 20 parylene, coil carrying cantilevers, which resonate with external vibrations with respect to a stationary magnet. It has been shown that 0.67 mV of voltage and 56 pW of power can be obtained from a single cantilever.
- The second type of generator increases the vibration frequency bandwidth by implementing cantilevers with varying length. The test results show that the bandwidth can be increased to 1000 Hz, while generating 9 mV of voltage and 1.7 nW of power.
- The third design, which has been considered in here for benchmarking purposes only, is a standard large mass coil type generator that has been widely used in the literature. The generator is composed of a stationary base with a coil and a resonating magnet-diaphragm assembly. The tests show that 0.3 mV and 40 pW can be obtained at 113 Hz.
- The final design mechanically up-converts low frequency environmental vibrations to a much higher frequency range. This generator has been implemented for the first time in the literature. It is composed of two parts; a diaphragm-magnet assembly on the top, and 20 cantilevers with series connected coils at the base. The diaphragm oscillates with external vibrations, and catches/releases the cantilevers from the tip points. The released cantilevers then start decaying out oscillations at their damped natural frequency. A maximum voltage and power of 0.57 mV and 0.25 nW can be obtained, respectively, from a single cantilever at a vibration frequency of 113 Hz.

Results of this project have been published at prestigious international conferences: **IEEE Sensors, Power MEMS, Transducers 2007**, and **IEEE Prime 2008**. Also, a journal paper has been published in **Sensors and Actuators A**. Besides these, **one Ph.D. thesis** has been completed, and one conference and two journal papers are in review process.

Keywords: Micro power generator, Energy harvesting, Frequency up-conversion, Microelectromechanical systems (MEMS).

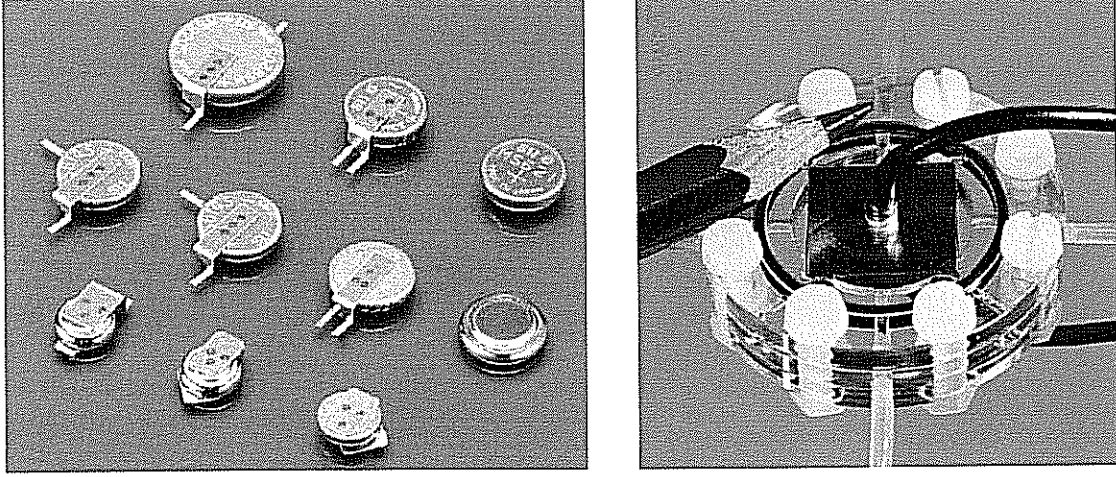
GİRİŞ

Son dönemlerde gitgide popüler olan MEMS teknolojisi sayesinde yüksek performanslı algılayıcılar (nem, sıcaklık, basınç, sarsıntı v.s. algılayıcıları) gayet düşük maliyetlerle üretilebilmekte ve bir yonga alanına birden fazla algılayıcı yerleştirilebilmektedir. Bu algılayıcıların silisyum üzerinde geliştirilmesi de CMOS elektronik devrelerle bütünleştirilmelerini sağlayarak karmaşık işleme devreleri ile beraber çalışmalarını mümkün kılmakta, başka bir deyişle akıllı algılayıcı sistemlerinin (smart sensor systems) yapılmasına imkan vermektedir. MEMS'in yanı sıra gelişen kablosuz iletişim (Wireless Networking) teknolojisi de bu algılayıcıların dış dünya ile iletişimlerini kolaylaştırmakta ve kablosuz çalışmalarına izin vererek başta çevresel gözlem olmak üzere pek çok askeri ve sivil uygulamada yeni kullanım alanları yaratmaktadır. Bunun yanı sıra, MEMS teknolojisiyle beraber günlük hayatımızda kullandığımız birçok elektronik cihaz (cep telefonları, avuç içi bilgisayarlar, müzik çalarlar, vs.) artık daha küçük boyutlarda üretilebilmekte ve çalışmak için daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Ancak bu sistemlerin çalışması için gerekli olan enerjinin sağlanması sistem performansını sınırlayan önemli bir faktör olarak sorun yaratmaktadır. Örnek olarak bugün bir cep telefonu bataryası, cep telefonunun toplam hacim ve ağırlığının büyük bir kısmını oluşturmaktadır.

Enerji üreteçlerindeki gelişmeleri mikro-sistemlerin gelişimine uygun hale getirmek amacıyla son yıllarda ticari piller ve alternatif enerji üreteçleri (mikro yakıt hücreleri, çevresel enerji kaynaklarından (ısı, ışık, sarsıntı, akustik, vs.) elektrik enerjisi üreten üreteçler) üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmıştır. Mikro-sistemlerin boyutu göz önüne alındığında ticari pillerle enerji sağlanması pratik bir çözüm değildir. Ticari pillerde kullanılan prensiple mikroboyutta pil yapılması halinde de hem sağlanan enerji hem de pilin ömrü önemli ölçüde azalmakta, algılayıcı sisteminin kullanım süresi de kısıtlanmaktadır. Mikro pillere (Şekil 1) kıyasla çok daha fazla enerji üretimi sağlayan mikro yakıt hücreleri (Şekil 1) ise yine sınırlı bir süre için enerji sağlayabilmekte ve periyodik yenilenme gerektirmektedirler. Bu da çevresel atık ve şarj edilme zorunluluğu gibi problemleri beraberinde getirmektedir.

Diğer taraftan çevresel enerji kaynakları (ısı, ışık, çevresel sarsıntı, akustik, vs.) hali hazırda etrafımızda kolay ulaşılabilen, temiz enerji kaynaklarıdır ve günümüzde sıkça kullanılmaktadır. Örneğin Şekil 2'de Seiko'nun geliştirdiği bir termal kol saati gösterilmektedir. Bu saat insan vücudunun yaydığı ısı enerjisiyle çalışmaktadır. Çevresel enerji kaynakları içinde sarsıntı her ortamda bulunabilir olmasından dolayı ayrı bir önem taşımaktadır. Kalabalık bir yol kenarındaki pencerelerdeki sarsıntı, insan vücudunun hareketi, herhangi bir motorun ya da otomobilin

yüzeyindeki sarsıntı çevresel sarsıntılara sadece bir kaç örnektir. Bugüne kadar sarsıntıdan mikroçip seviyesinde enerji üretmek üzere piezoelektrik, elektrostatik ve elektromanyetik çevirim yöntemleri sunulmuştur [1-7]. MEMS teknolojisi kullanarak çevresel sarsıntıyı elektriksel enerjiye çevirebilen çok küçük boyutlarda enerji üreteçleri yapılabilmektedir.

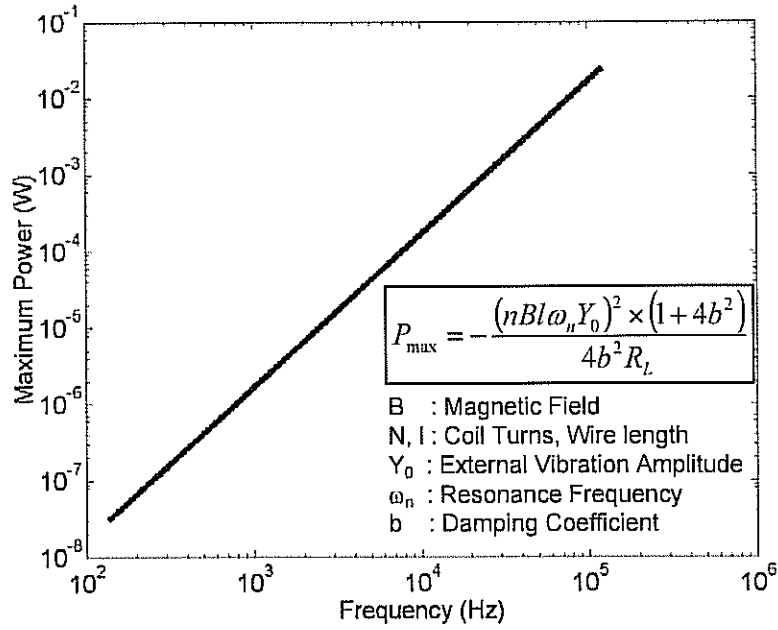


Şekil 1. Mikropiller (Seiko Instruments Inc.) ve bir yakıt hücresi (Fraunhofer ISE).

Bugüne kadar sunulan yöntemlerdeki temel sorun, elde edilen enerjinin çevresel sarsıntı frekansına bağımlı olması ve özellikle 1-10Hz arasında güç üretiminin nanowatt seviyesinde olmasıdır [3,5]. Halbuki bu frekans aralığı çevresel sarsıntının en yoğun olduğu aralıktır. Örnek olarak, duyarga sisteminin bir askerin kol saatine yerleştirilmesi ve enerjisinin askerin kol hareketlerinden kaynaklanan sarsıntıyla elde edilecek olması halinde literatürde sunulan yapılar bir çözüm olamamaktadır. Şekil 3’de bir elektromanyetik jeneratör için üretilen gücün sarsıntı frekansına olan bağlantısı görülmektedir.



Şekil 2. Termal ısı farkından enerji üretimi prensibi ile çalışan pilsiz bir kol saati (Seiko Thermic Watch).



Şekil 3. Bir elektromanyetik jeneratörde üretilen gücün sarsıntı frekansına göre değişimi

Bu araştırma projesinin amacı MEMS (MicroElectroMechanical Systems) teknolojisini kullanarak mikro işlenmiş sistemler ve entegre devreler için gerekli güç üretimini sağlayacak çip tasarlamaktır. Proje kapsamında aynı üretim süreciyle üretilebilen dört farklı tasarım geliştirilmiştir.

- Geliştirilen ilk yapı yüksek titreşim frekanslarında etkin olup, yüksek kalite faktörü nedeniyle dar bir bant aralığında enerji üretebilmektedir.
- İkinci yapıda bant aralığı daha geliştirilerek, değişken titreşim frekanslarında da etkin olarak enerji üretebilen bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistem aynı zamanda pilsiz frekans ölçer olarak da kullanılabilir.
- Üçüncü tasarım olarak literatürde sıkça kullanılan büyük kütle sarım jeneratörü önerilen yeni yapılarla bir kıyaslama sağlayabilmek amacıyla tasarlanmıştır.
- Projenin ana kısmını oluşturan son yapıda ise çevresel frekansın daha yoğun olarak bulunduğu 1-100Hz arası düşük frekanslarda frekans çevrim metodu ile enerji üreten bir sistem geliştirilmiştir.

Bu proje kapsamında yapılan çalışmalar dört farklı bildiri olarak uluslararası saygın konferanslarda sunulmuştur. Ayrıca bu alandaki en saygın dergilerden biri olan Sensors and Actuators A dergisinde bir makale yayımlanmış ve bir bildiri ve iki ayrı makale de yine uluslararası dergilere gönderilmiştir.

GENEL BİLGİLER

1. TEORİ ve LİTERATÜR ÖZETİ

Çevresel Kaynaklardan Enerji Üretim Yöntemleri

Kendi enerjisini kendi üreten uzaktan kumandalı mikrosistemler çevresel gözlemleme başta olmak üzere birçok kritik uygulama için değer taşımaktadır. Bu sistemler genellikle 10 μ W-1mW arasında güç tüketmektedirler. Sistem için gerekli enerji iki şekilde sağlanabilir [3, 4]: 1) Elektrokimyasal piller veya mikro yakıt hücreleri (micro fuel cells) kullanarak 2) Ortamda var olan enerjiyi (ısı, ışık, sarsıntı, akustik v.s.) elektrik enerjisi olarak bir kapasitör üzerine saklayarak (energy scavenging). Tablo 1’de birinci ve ikinci kategoride yer alan farklı güç kaynaklarının karşılaştırılması verilmiştir [5]. Elektrokimyasal piller veya mikro yakıt hücreleri birim hacimde daha fazla enerji sağlamalarına rağmen kimyasal reaksiyon içermeleri nedeniyle pratikte temiz yöntemler değildir. Ayrıca mikroçipin kapladığı alan düşünülecek olursa bu yöntemle üretilecek enerjinin ömrü ve miktarı oldukça sınırlıdır. Özellikle bir kaç yıllık ömrü olan bir çevresel duyarga sisteminde gerekli olan enerjinin bu yolla üretilmesi mümkün değildir. Ortamda var olan enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesi yöntemi (energy scavenging), diğer yöntemlere göre hem temiz (herhangi bir kimyasal reaksiyon içermemesi açısından) hem de uzun ömürlü olmasından dolayı son dönemlerde popüler hale gelmiştir. Bu yöntemde çevrede var olan birçok enerji kaynağından toplanan enerji elektrik enerjisine çevrilerek bir kapasitör üzerinde voltaj olarak depolanır.

Tablo 1’de görüldüğü üzere çevresel enerji kaynaklarından her biri farklı ortamlarda etkin olabilmektedir. Çevresel enerji kaynakları içinde sarsıntı (titreşim) her ortamda bulunabilir olmasından dolayı ayrı bir önem taşımaktadır. Kalabalık bir yol kenarındaki pencerelerdeki sarsıntı, insan vücudunun hareketi, herhangi bir motorun ya da otomobilin yüzeyindeki sarsıntı çevresel sarsıntılara sadece bir kaç örnektir. Bir sonraki bölümde titreşim tabanlı enerji üretim teknikleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Çevresel Titreşimden Enerji Toplayıcılar

Bugüne kadar sarsıntıdan mikroçip seviyesinde enerji üretmek üzere piezoelektrik, elektrostatik ve elektromanyetik çevirim yöntemleri sunulmuştur [1, 2, 6-8]. Daha önce yapılan çeşitli çalışmalarda bu teknikler kullanılarak yeterli düzeyde enerji üretilebildiği ve veri aktarma ve mikro-algılayıcı gibi sistemlerin çalıştırılabildiği gösterilmiştir. Bu projedeki amaç bu tekniklerden en uygun ve verimlisini seçerek düşük frekanslarda da çalışabilen verimli bir enerji jeneratörü ortaya koymaktır.

Tablo 1. Çeşitli Enerji Kaynaklarının Enerji Seviyeleri [5]

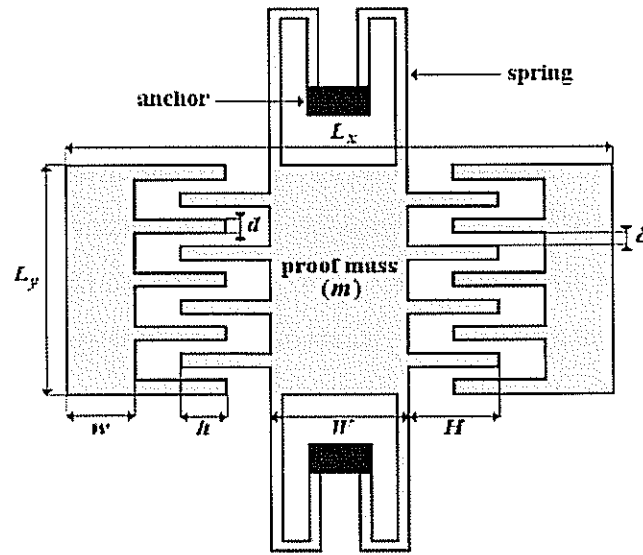
	Güç Seviyesi ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	
	1 Yıllık Çalışmada	10 Yıllık Çalışmada
Güneş (Dışarıda)	15,000 – güneşli günde 150 – bulutlu günde	15,000 – güneşli günde 150 – bulutlu günde
Güneş (İçeride)	6	6
Titreşim	100-200	100-200
Akustik gürültü	0.003 @ 75 dB	0.003 @ 75 dB
Günlük Sıcaklık Değişimi	10	10
Sıcaklık Değişimi	15 @ 10°C sıcaklık farkında	15 @ 10°C sıcaklık farkında
Nükleer Kaynak	850,000 (8% verimlilik)	850,000 (8% verimlilik)
Pil (Lityum)	89	7
Mikro motor	403	40.3
Yakıt Hücreleri (methanol)	560	56

Elektrostatik (Kapasitif) Enerji Toplayıcılar

Elektrostatik enerji toplayıcıları mekanik bir yapıdan oluşmakta ve ortamdan gelen hareket enerjisi bu yapının elektriksel kapasitansını değiştirmektedir. Yapılan tasarıma göre sistemin hareketi boyunca yapı ya voltaj ya da akım kaynağı gibi davranmaktadır. Eğer yapı içerisindeki voltaj sabit tutulursa, o zaman kapasitans değiştiğinde sistem üzerindeki akım da değişecek ve sistem bir akım kaynağı gibi davranacaktır. Elektriksel yükün sabit tutulduğu durumda ise yapının hareketi süresince yine kapasitans değişeceğinden bu defa sistem bir voltaj kaynağı gibi davranacaktır. Her iki durumda da sistem ortamda varolan sarsıntıyı elektriksel enerjiye dönüştürmektedir. Sistemin mekanik yapısı Şekil 4’de gösterilmiştir [9]. Bu şekilde gösterilen yapı özel olarak “tarak tipinde” bir elektrostatik dönüştürücüdür. Ortada gösterilen kütle “çapa” denilen koyu renkli bölgelerden sabitlenmiştir. Sistem titreştiğinde, paralel plakalar arasındaki uzaklık ya da eşdeğer alan değişmekte bu da sistemin kapasitansının değişmesine sebep olmaktadır. Ayrıca üretilen voltaj ya da akım kütlelerin hareketini engelleyen bir karşı kuvvet oluşturmaktadır. Bu kuvvetin mekanik eşdeğeri

aslında kuru sürtünme kuvveti gibi modellenebilir. Bu kuvvet ne kadar büyükse üretilen enerji de o kadar büyüktür, bu da sistemin hareket enerjisinin ne kadarının elektriksel enerjiye dönüştürüldüğünü gösterir.

Bu tipteki enerji toplayıcıları şimdiye kadar yapılan çalışmalarda yoğun olarak kullanılmıştır [1, 10-15]. Bunun sebebi elektrostatik enerji dönüştürücülerin MEMS teknikleri kullanılarak kolaylıkla imal edilebilmeleri ve düşük frekanslarda iyi performans göstermeleridir. Bu sistemin temel dezavantajı üretilen enerji seviyesinin diğer tekniklere oranla nispeten düşük olması ve enerji dönüşümünün başlatılması için ayrı bir voltaj ya da yük kaynağına (electret) ihtiyaç duyulmasıdır.



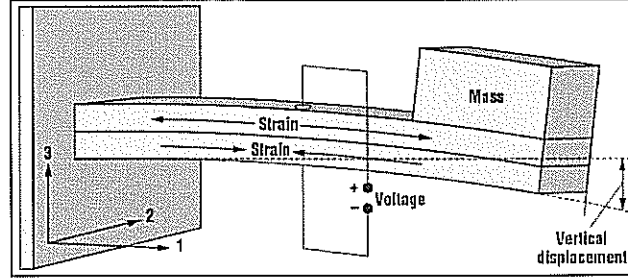
Şekil 4 Elektrostatik enerji toplayıcısının mekanik yapısı [9].

Piezoelektrik Enerji Toplayıcıları

Ortamdaki titreşimleri elektriksel enerjiye çevirebilen ikinci tip enerji üretici piezoelektrik dönüştürücülerdir. Bu sistem içinde kullanılan piezo malzeme hareket enerjisiyle deforme olmakta ve bu malzemenin doğası gereği bu deformasyon sonucunda elektriksel enerji üretilmektedir. Piezo malzemenin uçları arasında oluşan potansiyel fark sistemin hareket enerjisini sönümleyici bir etki yapmakta ve bu sayede mekanik enerji elektriksel enerjiye dönüştürülmektedir. Şekil 5'de bu sistemin mekanik yapısı gösterilmiştir [16]. Şekilden de anlaşılacağı üzere sistem piezo malzemenin uçları arasında oluşan potansiyel fark sistemin hareket enerjisini sönümleyici bir etki yapmakta ve bu sayede mekanik enerji elektriksel enerjiye dönüştürülmektedir. Şekil 5'de bu sistemin mekanik yapısı gösterilmiştir [16]. Şekilden de anlaşılacağı üzere sistem piezo malzemenin uçları arasında oluşan potansiyel fark sistemin hareket enerjisini sönümleyici bir etki yapmakta ve bu sayede mekanik enerji elektriksel enerjiye dönüştürülmektedir.

Daha önce bu konu ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında bu sistemin temel avantajı ayrı bir voltaj kaynağına ihtiyaç duyulmaması ve üretilen güç seviyesinin nispeten yüksek olmasıdır [5, 10, 17-21]. Burada kullanılan piezo malzeme hem sistemin empedansını artırmakta hem de sistemin

üretimini zorlaştırmaktadır. Sistemin empedansının yüksek olması üretilen enerjinin arayüz elektroniğine aktarılması sırasında verimliliği ciddi boyutlarda düşürmekte ve elektronik devre tasarımını zorlaştırmaktadır.

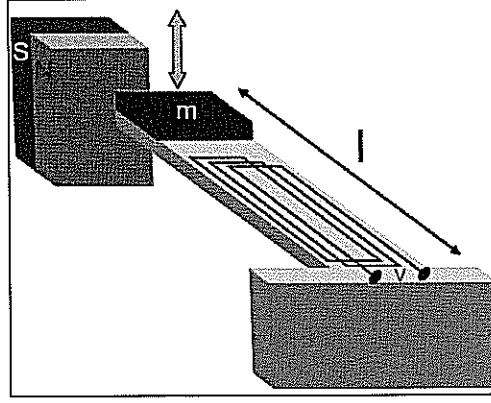


Şekil 5. Piezoelektrik enerji toplayıcısının mekanik yapısı [16].

Elektromanyetik (İndüktif) Enerji Toplayıcıları

Elektromanyetik enerji toplayıcılar çevresel sarsıntıyı elektriksel enerjiye bir manyetik alan içerisinde hareket eden sarımlar sayesinde dönüştürmektedir. Sistemin Şekil 6'da gösterilen mekanik yapısına bakıldığında bir silikon kol ve bu kolun üzerine serilmiş sarımlar görülmektedir [22]. Silikon kolun tam karşısında duran mıknatıs sürekli bir manyetik alan oluşturmaktadır. Çevresel titreşimler yapıyı (ya da mıknatısı) sallamakta ve yapı (ya da mıknatıs) salındıkça kol üzerinde bulunan sarım manyetik alanı kesmektedir. Sonuç olarak Faraday yasasına göre elektromanyetik indüksiyon yöntemiyle elektriksel enerji üretilmektedir. Burada oluşan elektromotif kuvvet sistemin dinamik hareketini azaltacak yönde çalışmakta ve bu etki ne kadar yüksekse üretilen enerji de o kadar fazla olmaktadır. Bu sistemin temel avantajı üretilen enerjinin yüksek olması, ek bir voltaj kaynağına ihtiyaç duymadan çalışabilmesi ve mikro işleme yöntemleri kullanılarak kolaylıkla üretilebilmesidir.

Yukarıda tanımlanan üç teknik arasında elektrostatik tipteki dönüştürücüler düşük enerji seviyeleri ve ikinci bir voltaj ya da yük kaynağına ihtiyaç duymaları sebebiyle bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Piezoelektrik ve elektromanyetik tipteki dönüştürücüler ise çalışma prensibi olarak birbirlerine benzemektedirler. Her iki durumda da sistemin hareketini engellemeye çalışan sönümleyici kuvvetler oluşmakta ve bu kuvvetler aslında mekanik enerjiyi elektriksel enerjiye dönüştürmektedir. Her iki teknikte de ayrı bir voltaj kaynağına ihtiyaç duyulmamaktadır. Son olarak iki durumda da üretilen enerji miktarı birbirine yakındır. Diğer taraftan piezoelektrik çevrim yöntemindeki temel dezavantaj sistemin empedansının yüksek olması ve MEMS yöntemleriyle üretimindeki güçlüklerdir. Bu karşılaştırmalar sonucunda, daha önce proje öneri formunda da bahsedildiği üzere, elektromanyetik indüksiyon ile çevirim yöntemi üzerine yoğunlaşmıştır.



Şekil 6. Elektromanyetik enerji toplayıcısının mekanik yapısı [22].

2. ÇALIŞMANIN KAPSAMI

Literatürde daha önce elektromanyetik indüksiyon yöntemi ile enerji çevirimi konusunda yapılmış çalışmalar vardır [1, 2, 10, 18, 19, 22, 23]. Bu çalışmalar sonucunda düşük frekans aralığında (1-100Hz) elde edilen güç değerleri nanowatt seviyelerindedir. Bu da bir mikro sistemin çalıştırılması için gereken gücün çok altındadır. Ayrıca önceki çalışmaların çoğunda yetersiz matematiksel modelleme yapılmış olduğundan üretilen güç değerlerinde tutarsızlık gözlemlenmektedir. Literatürdeki bu eksiklikler göz önüne alınarak ve bir önceki bölümde açıklanan sebeplerden dolayı çalışmanın amacı ve kapsamı aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

- Standart bir mikro-elektromanyetik enerji üreticinin tasarımı ve üretimi
- Daha önceki çalışmalarda çoğunlukla yetersiz düzeyde yapılmış matematiksel sistem modellemesinin geliştirilmesi
- Sistem parametrelerinin çeşitli optimizasyon algoritmaları kullanılarak iyileştirilmesi ve üretilen gücün optimize edilmesi
- Düşük frekanslarda da yüksek güç üretebilen ve daha önce hiç çalışılmamış bir yöntem kullanılarak üretilen güç seviyesinin yüksek seviyelere çıkartılması. Burada temel amaç proje yürütücüsünün Michigan'da doktora sonrası yaptığı bir çalışma olan "frekans çevirimi" yöntemini [22, 23] kullanarak sistemin düşük frekanslarda da yüksek verimlilikle çalışmasını sağlamaktır.

Yukarıda belirtilen hedeflere ulaşabilmek amacıyla aşağıdaki iş planı izlenmiştir:

- Tek rezonans koldan oluşan bir üreticinin eşdeğer kütle-yay-sönümleyici kullanarak modellenmesi ve tasarımı.

- Matlab® ortamında geliştirilecek bir algoritma kullanılarak bu modelin parametrelerinin maksimum güç için optimizasyonu.
- Çoklu rezonans kolların değişen hacim, büyüklük ve yapısal malzemeler için analizi ve optimizasyonu.
- Bu modellerin Matlab® Simulink® ortamında benzetim çalışmalarının yürütülmesi.
- Düşük frekanslarda da yüksek güç seviyesi vermesi beklenen “frekans çevirimi” tekniğinin modellenmesi ve tasarımı.
- Matlab® Simulink® ortamında bu sistemin optimizasyonu.
- Standart bir mikro-üretecin üretilmesi ve performans testlerinin yürütülmesi.
- “Frekans çevirimi” tekniğinin üretimi ve performans testlerinin yürütülmesi.

Bu plan izlenirken, dört farklı üreteç yapısı geliştirilmiş ve test edilmiştir.

GEREÇ VE YÖNTEM

Çevresel sarsıntıdan elektrik enerjisi üretimi daha önceki bölümde de bahsedildiği gibi elektromanyetik indüksiyon yöntemi ile yapılabilir. Burada esas olan bir sarım ve bir mıknatısın birbirlerine göreceli hareketli olmasıdır. Bu amaçla bu proje kapsamında, farklı uygulama alanları için farklı yapıda tasarımlar geliştirilmiştir. Bu tasarımlar dört grup halinde sıralanabilir.

- Seri rezonans kollar, (Array of cantilevers (AOC)),
- Geniş frekans bandında çalışan seri rezonans kollar (Frequency sweeping array of cantilevers (AOC_FS))
- Büyük kütle-sarım yapısı, (Large mass coil (LMC)),
- Frekans çevrimi yöntemi, (Frequency up-converter (FUC)).

Bu bölümde bu dört yapının detaylı modellenmesi, tasarımı ve üretimi ile ilgili bilgiler sunulmaktadır

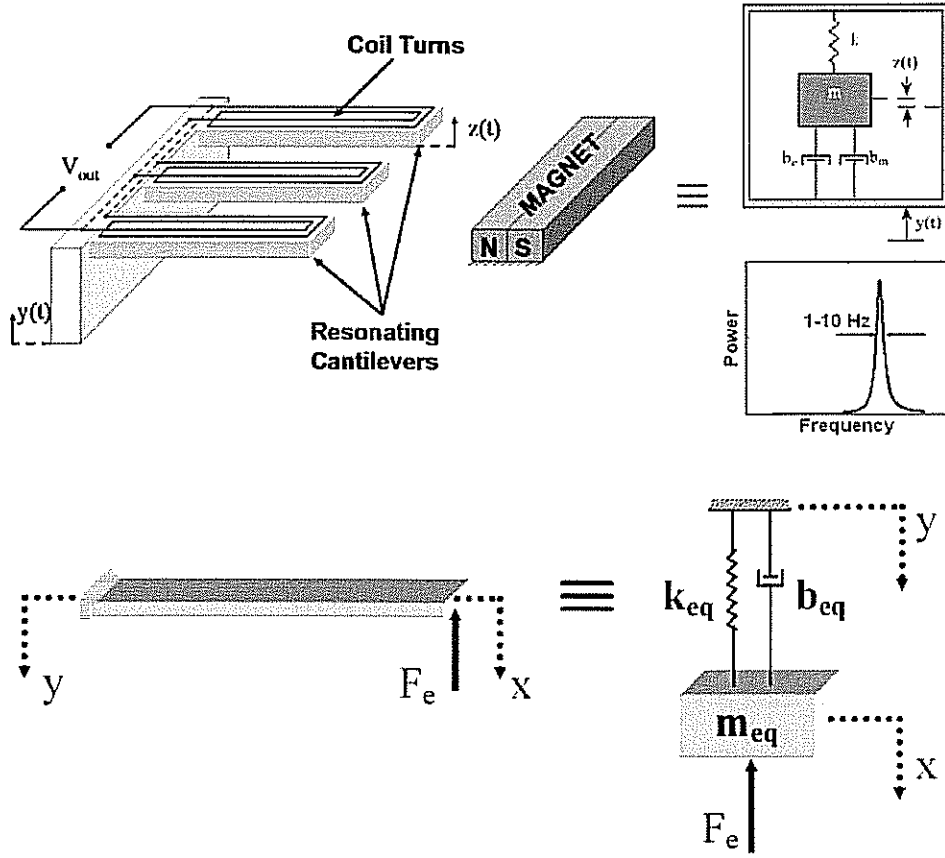
Matematiksel Modelleme

Seri Rezonans Kollar İçin Matematiksel Modelleme

Şekil 7’de bu proje kapsamında geliştirilen birinci yapı eşdeğer modeli ile birlikte görülmektedir. Bu yapı birbirinin aynısı asılı kollardan (cantilever) oluşmaktadır ve her bir kolun üzerinde sarımlar bulunmaktadır. Bu sarımlar seri halde bağlı olup, kolların sabit bir mıknatısa göre hareket etmesi sonucunda voltaj üretmektedirler.

Bu bölümde tek serbestlik dereceli rezonans kolun eşdeğer kütle, yay sabiti ve sönüm oranı gibi parametreleri ve sistem denklemleri elde edilecektir. Bu parametreler proje kapsamında geliştirilecek olan ilk üç yapının performansının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada kullanılacak modelde rezonans yapının bir ucu hareketsiz diğer ucunun ise hareket serbestliği vardır. Bu nedenle, eşdeğer parametrelerin çıkarımı hareket serbestliği olan uca göre yapılacaktır. İlk adımda rezonans kolun eşdeğer kütle ve yay sabiti elde edilecek daha sonra bu parametreler Newton’un 2. yasasında kullanılarak sistem denklemleri çıkartılacaktır. İkinci adımda ise sistemin elektromanyetik modeli ilk adımda elde edilen mekanik modele eklenecektir. Son olarak elde edilen sistem denklemleri ve elektromanyetik model kullanılarak elektromanyetik indüksiyon yöntemiyle üretilen güç matematiksel olarak gösterilecektir. Burada amaç ilk planda hangi sistem parametrelerinin üretilen güç üzerinde ne kadar ve nasıl etkili olduğunu göstermektir.

Burada elde edilen sonuçlar daha sonra sistem parametrelerinin optimum değerlerinin bulunmasında da kullanılacaktır.



Şekil 7. Seri rezonans kol yapısı ve eşdeğer mekanik modeli

Şekil 7’de gösterilen parametreler aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

- M : Serbest uç üzerindeki kütle,
- E : Rezonans kolun elastik Young modülü,
- L : Rezonans kolun uzunluğu,
- I : Rezonans kolun alansal atalet momenti,
- x : Rezonans kolun serbest ucunun mutlak yer değışımi,
- y : Ortamdaki titreşiminin büyüklüğü,
- F_e : Rezonans kolda mıknatıs ve sarımdan dolayı oluşan karşı elektromotif kuvvet,
- m_{eq} : Rezonans yapının eşdeğer kütlesi,
- k_{eq} : Rezonans yapının eşdeğer yay sabiti,
- b_{eq} : Yapının eşdeğer sönüm sabiti.

Eşdeğer yay sabiti, rezonans kolun serbest ucunun yer değişiminden bulunabilir. Uç noktadaki yer değişimi aşağıda verilen denklem ile ifade edilebilir.

$$x_{\max} = \frac{FL^3}{3EI} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde F, uç noktadaki kuvveti göstermektedir.

Sonuç olarak $F = k_{eq} x_{\max}$ eşitliği kullanılarak, eşdeğer yay sabiti denklem 2 ile ifade edilebilir,

$$k_{eq} = \frac{3EI}{L^3} \quad (2)$$

Eşdeğer kütle ise sistemin aşağıda verilen toplam kinetik enerjisinden bulunabilir,

$$T_{beam} = \frac{1}{2} \frac{m}{L} \int_0^L \dot{x}^2(l) dl \quad (3)$$

Burada eşdeğer kütle serbest uç noktada toplanacağından, rezonans kolun uzunluğuna bağlı olan dikey hızı, $\dot{x}(l)$, kolun maksimum hızına göre yazılmalıdır. Rezonans kolun maksimum hızı aşağıdaki ifadede verilmiştir.

$$\dot{x}(l) = \dot{x}_{\max} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{x}{L} \right)^3 - \frac{3}{2} \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Son denklemde x_{\max} denklem 1 tarafından ifade edilmektedir ve birçok mukavemet kitaplarında bulunabildiğinden burada çıkarımı gösterilmemiştir. Sonuç olarak sistemin toplam kinetik enerjisi denklem 5 ile ifade edilebilir.

$$T_{beam} = \frac{1}{2} \left(\frac{33}{140} m + M \right) \dot{x}_{\max}^2 = \frac{1}{2} (m_{eq}) \dot{x}_{\max}^2 \quad (5)$$

Bu ifade eşdeğer kütle kinetik enerjisine eşitlenirse sistemin eşdeğer kütlesi aşağıdaki bulunur,

$$m_{eq} = \left(\frac{33}{140} m + M \right) \quad (6)$$

Son olarak sistemin eşdeğer sönüm sabiti, mekanik ve elektriksel sönüm sabitlerinin toplamı olarak gösterilebilir,

$$b_{eq} = b_m + b_e \quad (7)$$

bu ifadede,

b_m : Mekanik sönüm sabitini,

b_e : Elektriksel sönüm sabitini sembolize etmektedir.

Mekanik ve elektriksel sönüm sabitlerinin sistem parametreleri cinsinden ifadeleri daha sonraki bölümlerde gösterilecektir.

Şekil 7'de gösterilen modele Newton'un 2. yasası uygulandığında denklem 8'de gösterilen ifade elde edilebilir.

$$m_{eq}\ddot{x} + b_m(\dot{x} - \dot{y}) + k_{eq}(x - y) = -F_e \quad (8)$$

Bu ifadede eşdeğer kütle nin destek noktasına göre rölatif yer değişimi $z = x - y$ ile ifade edilirse yukarıda verilen denklem aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$m_{eq}(\ddot{z} + \ddot{y}) + b_m\dot{z} + k_{eq}z + F_e = 0 \quad (9)$$

$$m_{eq}\ddot{z} + b_m\dot{z} + k_{eq}z + F_e = -m_{eq}\ddot{y} \quad (10)$$

Denklem 8 eşdeğer sistemin dinamik hareketini göstermektedir. Bu denklemde F_e ile gösterilen elektromanyetik kuvvet Faraday ve Ohm yasaları kullanılarak bulunabilir. Bu durumda sarım üzerinde oluşan ve rezonans kola etki eden elektromotif (emf) kuvvet denklem 11 ile ifade edilebilir.

$$\varepsilon = BL_p\dot{z} \quad (11)$$

bu denklemde,

ε : Elektromotif kuvveti,

B : Manyetik akı yoğunluğu,

L_p : Sarım uzunluğu.

Faraday yasası kullanılarak da, elektromanyetik kuvvet, F_e , aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$F_e = BL_p i \quad (12)$$

Son denklemden gösterilen, i , sarım üzerinde indüklenen akımı göstermektedir. Elektriksel devrenin sadece yük direnci, R_L 'den oluştuğu varsayılır ve sarım direnci, R_c , ihmal edilirse, sarımda indüklenen akım, Ohm yasası kullanılarak, aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$i = \frac{\varepsilon}{R_L + R_c} \quad (13)$$

Denklem 11 ve 13, denklem 12'de kullanılırsa, elektromanyetik kuvvet, F_e , için \dot{z} cinsinden aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$F_e = \frac{(BL_p)^2}{R_L + R_c} \dot{z} \quad (14)$$

Bu denklem 10'da kullanıldığında aşağıdaki ifade bulunabilir,

$$m_{eq} \ddot{z} + \left(b_m + \frac{(BL_p)^2}{R_L + R_c} \right) \dot{z} + k_{eq} z = -m_{eq} \ddot{y} \quad (15)$$

Yukarıdaki ifade tekrar yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilebilir,

$$m_{eq} \ddot{z} + b_{eq} \dot{z} + k_{eq} z = -m_{eq} \ddot{y} \quad (16)$$

Daha önce eşdeğer sönüm sabiti $b_{eq} = b_m + b_e$ ile ifade edilmişti. Bu ifade denklem 15 ile karşılaştırılırsa, elektriksel sönüm oranı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$b_e = \frac{(BL_p)^2}{R_L + R_c} \quad (17)$$

Sonuç olarak elektriksel güç denklemini sistem parametreleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$P = \frac{1}{2} i^2 R_L = \frac{1}{2} \left[\frac{(BL_p)^2}{(R_L + R_c)^2} \dot{z}^2 \right] R_L = \frac{1}{2} \frac{(BL_p)^2}{(R_L + R_c)^2} R_L \dot{z}^2 \quad (18.a)$$

$$P = \frac{1}{2} b_e \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) \dot{z}^2 \quad (18.b)$$

Yukarıdaki denklem elde edilirken elektriksel gücün yük direnci üzerinden çekildiği ve elektriksel kayıpların olmadığı varsayılmıştır.

Denklem 18.b incelendiğinde güç denklemini elde edebilmek için sistemin destek noktasına göre rölatif hızı, \dot{z} , bilinmelidir. Eğer geçici etkiler ihmal edilir ve sistem girdisi, $y(t)$ 'nin sinüzoidal olduğu kabul edilirse anlık güç, denklem 16'nın Laplace dönüşümü alınarak ve daha sonra 's' terimleri yerine $s = j\omega$ yer değişimi yapılarak elde edilebilir. Sonuç olarak, rölatif yer değişimi, z 'nin Laplace dönüşümü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Z(s) = -\frac{m_{eq}s^2}{m_{eq}s^2 + b_{eq}s + k_{eq}} Y(s) \quad (19)$$

Burada sistem girdisinin aşağıda gösterilen formda olduğu kabul edilebilir.

$$y(t) = Y \sin(\omega t) \quad (20)$$

Yukarıdaki denklemde Y sistem girdisinin büyüklüğünü, ω ise frekansını ifade etmektedir. Sistemin rölatif hızının büyüklüğü denklem 20'de $s = j\omega$ yerleştirilmesi yapılarak, zamanla değişen kısmı ise girdi sinyaline faz açısı eklenerek bulunabilir. Sonuç olarak sistem kararlı duruma geldiğinde rezonans kolun destek noktasına göre rölatif hızı, $z(t)$, aşağıdaki ifadeyle temsil edilebilir,

$$z(t) = \left| \frac{m_{eq} \omega^2 Y}{-m_{eq} \omega^2 + j\omega b_{eq} + k_{eq}} \right| \sin(\omega t + \varphi) \quad (21)$$

Faz açısı ise aşağıdaki ifade kullanılarak bulunabilir,

$$\varphi = -\tan^{-1} \left(\frac{\omega b_{eq}}{k_{eq} - m_{eq} \omega^2} \right) = -\tan^{-1} \left(\frac{2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right) \quad (22.a)$$

Ayrıca sönüm oranı $\zeta_{eq} = \zeta_m + \zeta_e = \frac{b_m + b_e}{2m_{eq}\omega_n} = \frac{b_{eq}}{2m_{eq}\omega_n}$ denklemiyle ve doğal frekans $\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}}$

ifadesiyle gösterilirse, denklem 21 sistemin sönüm oranı ve doğal frekansı cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$z(t) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} Y \sin(\omega t + \varphi) \quad (22.b)$$

Yukarıdaki ifadenin frekansa göre türevi alınarak maksimum rölatif yer değişimin olduğu nokta denklem 22.c ile bulunabilir,

$$\omega = \frac{\omega_n}{\sqrt{1 - 2\zeta_{eq}^2}} \quad (22.c)$$

Sonuç olarak $z(t)$ 'nin maksimum olduğu aşağıda verilen denklemle bulunabilir,

$$z_{max} = \frac{Y}{2\zeta_{eq} \sqrt{1 - \zeta_{eq}^2}} \quad (22.d)$$

Uç noktanın ya da eşdeğer kütlelin rölatif hızı ise denklem 22'nin türevi alınarak bulunabilir,

$$\dot{z}(t) = \frac{m_{eq} \omega^3 Y}{\sqrt{(k_{eq} - m_{eq} \omega^2)^2 + (\omega b_{eq})^2}} \cos(\omega t + \varphi) \quad (23)$$

Ayrıca denklem 23 sistemin sönüm oranı ve doğal frekansı türünden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{z}(t) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \omega Y}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \cos(\omega t + \varphi) \quad (24)$$

Burada not edilmesi gereken bir nokta sistemin rölatif maksimum hıza $\omega \rightarrow \infty$ da erişeceğinden, rölatif hız ile ilgili bir üst değer yoktur. Sonuç olarak denklem 24, denklem 18'de kullanılırsa sistem kararlı durumdayken anlık güç değeri aşağıdaki ifadeyle bulunabilir.

$$P(t) = \frac{1}{2} b_e \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^4 \omega^2 Y^2}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (25)$$

Yukarıdaki denklemde, b_e terimi $b_e = 2m_{eq}\zeta_c\omega_n$ ifadesiyle de gösterilebilir. Burada ζ_c elektriksel sönüm oranı gibi düşünülebilir. Eğer bu denklem, denklem 25'de kullanılırsa aşağıda verilen ifade bulunabilir.

$$P(t) = \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) \frac{m_{eq}\zeta_c \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^3 \omega^3 Y^2}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right)^2 + \left(2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (26)$$

Faz açısı denklem 22'den aşağıdaki yazılabilir,

$$\varphi = -\tan^{-1} \left(\frac{\omega b_{eq}}{k_{eq} - m_{eq}\omega^2} \right) = -\tan^{-1} \left(\frac{2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right) \quad (27)$$

Sonuç olarak denklem 26 ve 27 sistem kararlı durumda iken üretilen anlık güç değerini sistem parametrelerine ve frekansa bağlı olarak göstermektedir. Daha önce belirtildiği gibi bu denklemler elde edilirken aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

- Elektriksel dönüşüm verimliliği % 100 olarak alınmıştır.
- Sistemin geçici cevabı kararlı durumdaki cevabını etkilememektedir.
- Sisteme girdi olarak $y(t) = Y\sin(\omega t)$ şeklinde bir sinüzoidal yer değişim verilmektedir.

Sistem parametreleri cinsinden ve en açık haliyle güç denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$P(t) = \frac{1}{2} \underbrace{\left(\frac{(BL_p)^2}{R_L + R_c} \right)}_{b_e} \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) \left(\frac{(m_{eq}Y)^2 \omega^6}{(k_{eq} - m_{eq}\omega^2)^2 + (\omega(b_e + b_m))^2} \right) \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (28)$$

Bu denklemin de gösterdiği gibi elde edilen güç, sarım üzerindeki manyetik alanın büyüklüğüne, sarım ve yük empedansına, rezonans kolunun boyutlarına ve dolayısı ile kütle, yay sabiti gibi mekanik parametrelerine, ortamın salınım genliğine ve salınım frekansına doğrudan bağlıdır. Maksimum güç için tüm bu parametrelerin optimize edilmesi zorunludur.

Ayrıca, eğer sistemin mutlak yer değişimi bulunmak istenirse aşağıdaki ifade kullanılabilir,

$$m_{eq} \ddot{x} + b_{eq} \dot{x} + k_{eq} x = b_{eq} \dot{y} + k_{eq} y \quad (29)$$

Bir önceki aşamada izlenen yola benzer bir yol ile sistemin mutlak yer değişimi için aşağıdaki ifade bulunabilir,

$$x(t) = \frac{\sqrt{1 + \left(2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} Y \sin(\omega t + \psi) \quad (30)$$

Bu durumda faz açısı, ψ aşağıdaki gibi ifade edilmektedir,

Maksimum mutlak deplasman, $x(t)$ aşağıda verilen frekansta oluşmaktadır,

$$\omega = \frac{\omega_n}{2\zeta_{eq}} \left(\sqrt{1 + 8\zeta_{eq}^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (31)$$

Bu frekansa karşılık gelen maksimum deplasman değeri ise denklem 34'de verilmiştir.

$$x_{max} = 4\zeta_{eq}^2 \left[\frac{\sqrt{1 + 8\zeta_{eq}^2}}{2 + 16\zeta_{eq}^2 + (16\zeta_{eq}^4 - 8\zeta_{eq}^2 - 2)\sqrt{1 + 8\zeta_{eq}^2}} \right] Y \quad (32)$$

Eşdeğer Sistemin Matematiksel Modeli (Sistemin İlk Değer Koşuluna Tepkisi)

Raporun bu bölümünde sistemin ilk değer koşuluna tepkisi ile ilgili matematiksel model elde edilecektir. Burada elde edilecek denklemler daha sonraki kısımlarda detaylı olarak açıklanan "Frekans çevirimi" tekniğinde kullanılacaktır.

Sistem denklemleri bir önceki bölümde aşağıdaki gibi bulunmuştu,

$$m_{eq} \ddot{x} + b_{eq} \dot{x} + k_{eq} x = 0 \quad (33)$$

Yukarıdaki denklemde, elektromanyetik kuvvet, F_e , eşdeğer sönüm sabiti, b_{eq} 'ın içinde ifade edilmiş olup elektriksel sönüm sabiti, b_e 'den elde edilmesi basamakları bir önceki bölümde gösterilen basamaklarla aynı olduğundan burada tekrarlanmayacaktır.

Denklem 33'in $x(0) = x_0$, $\dot{x}(0) = 0$ ilk koşulları da göz önüne alınarak Laplace dönüşümü alınır ve daha sonra ters Laplace dönüşümüyle $x(t)$ için çözülürse rezonans kolun deplasmanı için aşağıdaki ifade elde edilebilir,

$$x(t) = x_0 \omega_n \frac{e^{-\zeta_{eq} \omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta_{eq}^2}} \left(\zeta_{eq} \sin(\omega_d t) + \sqrt{1 - \zeta_{eq}^2} \cos(\omega_d t) \right) \quad (34)$$

Yukarıdaki denklemin türevi alınarak kolun hız ifadesine ulaşılabilir,

$$\dot{x}(t) = -x_0 \omega_n \frac{e^{-\zeta_{eq} \omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta_{eq}^2}} \sin(\omega_d t) \quad (35)$$

Sonuç olarak sadece ön koşullar göz önüne alındığında, $P = \frac{1}{2} b_c \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) \dot{x}^2$ ifadesi kullanılarak anlık güç denklemi aşağıdaki gibi bulunur,

$$P = \frac{1}{2} b_c \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) \left[x_0 \omega_n \frac{e^{-\zeta_{eq} \omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta_{eq}^2}} \sin(\omega_d t) \right]^2 \quad (36)$$

Rezonans yapının sönüm oranı ve doğal frekansı kullanılarak ve $b_c = 2m_{eq} \zeta_c \omega_n$ eşitliğinin 36'ya yerleştirilerek güç ifadesi aşağıdaki de yazılabilir,

$$P = \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) m_{eq} \zeta_c \omega_n^3 \left[x_0^2 \frac{e^{-2\zeta_{eq} \omega_n t}}{(1 - \zeta_{eq}^2)} \sin^2(\omega_d t) \right] \quad (37)$$

Ayrıca denklem 34'ten 37'a kadar verilen ifadelerde kullanılan ω_d rezonans kolun sönümlü doğal frekansı olup aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta_{eq}^2} \quad (38)$$

Sistem Parametrelerinin Üretilen Elektriksel Güç Üzerindeki Etkisi

Rezonans yapının sabit destek noktasına uygulanan girdi sonucunda elde edilen güç ifadesi bir önceki bölümde elde edilmişti. Bu ifade takip kolaylığı için burada tekrar edilmiştir,

$$P(t) = \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) \frac{m_{eq} \zeta_e \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^3 \omega^3 Y^2}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right)^2 + \left(2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (39)$$

Faz açısı ise aşağıdaki gibidir,

$$\varphi = -\tan^{-1} \left(\frac{\omega b_{eq}}{k_{eq} - m_{eq} \omega^2} \right) = -\tan^{-1} \left(\frac{2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right) \quad (40)$$

Sistem parametreleri kullanılarak güç denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$P(t) = \frac{1}{2} \underbrace{\left(\frac{(BL_p)^2}{R_L + R_c} \right)}_{b_e} \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) \left(\frac{(m_{eq} Y)^2 \omega^6}{(k_{eq} - m_{eq} \omega^2)^2 + (\omega(b_e + b_m))^2} \right) \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (41)$$

Ayrıca burada sistem girdisinin aşağıdaki formda olduğu kabul edilmektedir.

$$y(t) = Y \sin(\omega t) \quad (42)$$

Girdi matematiksel olarak ifade edilirken aşağıdaki varsayımlar göz önünde bulundurulmuştur.

- Girdi tek frekanstan oluşmaktadır.
- Girdi sinyalinin büyüklüğü frekanstan bağımsızdır.

Bu bölümde temel amaç aşağıdaki karakteristik sistem parametrelerinin üretilen elektriksel gücü nasıl etkilediğini araştırmaktır.

- Girdi frekansı, ω .
- Rezonans kolun doğal frekansı, ω_n .
- Elektriksel ve mekanik sönüm oranları, sırasıyla, ζ_e ve ζ_m .
- Eşdeğer kütle, m_{eq} .

- Eşdeğer yay sabiti, k_{eq} .

Girdi Frekansının Üretilen Güç Üzerindeki Etkisi

Denklem 39 kullanılarak girdi frekansının üretilen gücü nasıl etkilediği bulunabilir. Eğer bu denklemdeki $\Lambda = m_{eq} \zeta_e Y^2 \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right)$ terimi sabit kabul edilirse üretilen gücün büyüklüğü aşağıda verilen denklemle ifade edilebilir.

$$|P(t)| = \frac{\Lambda \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^6 \omega_n^3}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right)^2 + \left(2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \quad (43)$$

Daha sonra denklem 44 ile ifade edilen birimsiz frekans oranı tanımlanabilir,

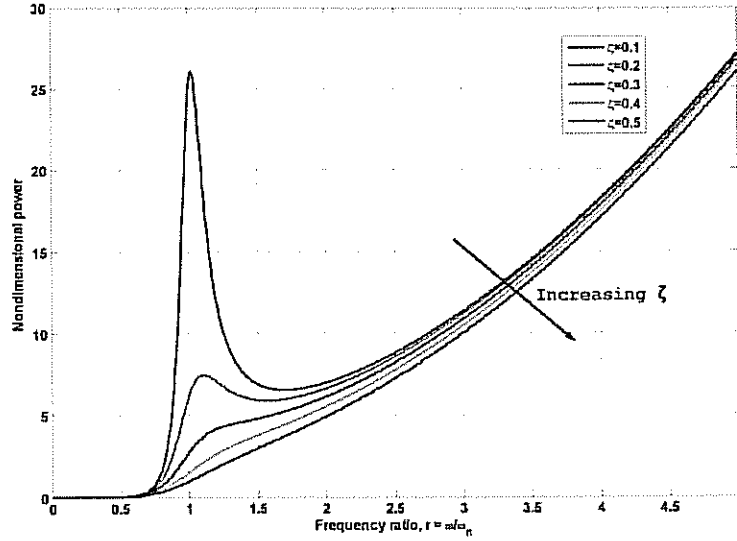
$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (44)$$

Birimsiz frekans oranı kullanılarak denklem 43 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir,

$$|P(t)| = \frac{\Lambda r^6 \omega_n^3}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta_{eq} r)^2} \quad (45)$$

Ayrıca eğer sistemin doğal frekansının da değişmediği kabul edilirse o zaman üretilen elektriksel gücün büyüklüğü sadece frekans oranına ve sönüm oranına bağlı olacaktır. Sonuç olarak frekans oranı için $0 \leq r \leq 5$, sönüm oranı için de $0.1 \leq \zeta_{eq} \leq 0.5$ aralığı kullanılırsa gücün bu iki parametreye bağlı değişimi Şekil 8'deki gibi değiştiği gösterilebilir. Bu grafik elde edilirken $\Lambda \omega_n^3 = 1$ teriminin sabit olduğu unutulmamalıdır.

Elde edilen grafiğe bakıldığında eğer $\Lambda = m_{eq} \zeta_e Y^2 \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right)$ ve özellikle doğal frekans, ω_n , sabit tutularak girdi frekansı artırıldığında üretilen güç sönüm oranının yaklaşık $\zeta_{eq} \gtrsim 0.25$ olduğu değerler için frekans oranının karesiyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Eğer sönüm oranı $\zeta_{eq} \lesssim 0.25$ ise artan frekans oranı değerleri için güç grafiği yaklaşık ω_n civarında lokal maksimum yapmakta, daha sonra bir miktar azalmakta ve frekans oranı $r \gtrsim 2$ için frekans oranının karesiyle doğru orantılı olarak artmaktadır.



Şekil 8. Üretilen Gücün Frekans Oranına Bağlı Değişimi, $r = \omega/\omega_n$

Güç grafiği sönüm oranının $\zeta_{eq} \gtrsim 0.25$ olduğu değerler için aşağıdaki frekans oranlarında lokal maksimum yapmaktadır.

$$r_{max} = \frac{\omega}{\omega_n} = \sqrt{-2(2\zeta_{eq}^2 - 1) - \sqrt{16\zeta_{eq}^4 - 16\zeta_{eq}^2 + 1}}, \text{ for } \zeta_{eq} \gtrsim 0.25 \quad (46.a)$$

Ayrıca yine $\zeta_{eq} \gtrsim 0.25$ bölgesinde aşağıdaki noktalarda da lokal minimum yapmaktadır,

$$r_{min} = \frac{\omega}{\omega_n} = \sqrt{-2(2\zeta_{eq}^2 - 1) + \sqrt{16\zeta_{eq}^4 - 16\zeta_{eq}^2 + 1}}, \text{ for } \zeta_{eq} \gtrsim 0.25 \quad (46.b)$$

Eğer bu defa girdi frekansı, ω , sabit iken sistemin doğal frekansı, ω_n , değiştirildiğinde güç büyüklüğünün nasıl değiştiği görülmek isteniyorsa Şekil 6 incelenebilir. Bu durumda yeni frekans

oranı $q = \frac{\omega_n}{\omega}$ olacak ve yine grafik elde edilirken $\Lambda = m_{eq}\zeta_c Y^2 \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right)$ teriminin sabit olduğu

kabul edilecektir. Tanımlanan $q = \frac{\omega_n}{\omega}$ frekans oranı denklem 39'da kullanılırsa aşağıdaki ifade elde edilebilir.

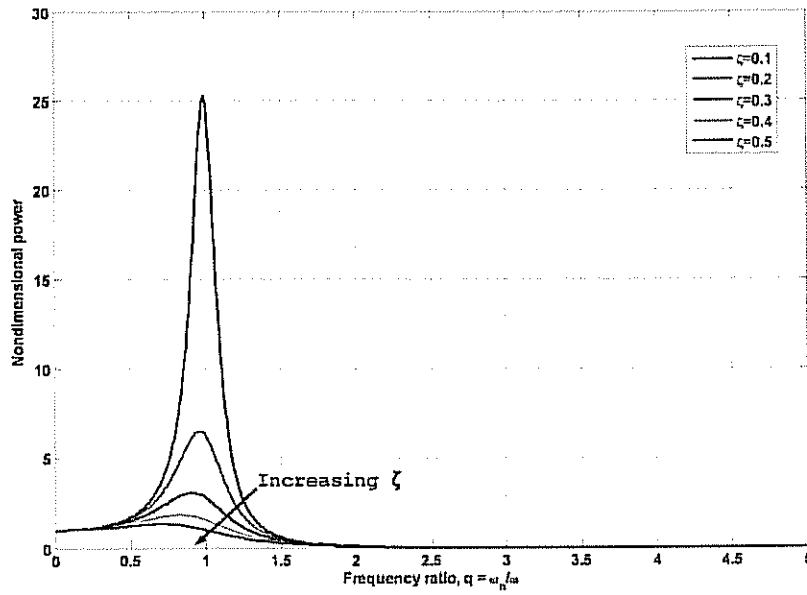
$$|P(t)| = \frac{\Lambda(q)\omega^3}{((q)^2 - 1)^2 + (2\zeta_{eq}q)^2} \quad (47)$$

Denklem 47'de verilen ifade aşağıda verilen frekans oranlarında, $\left(q = \frac{\omega_n}{\omega} \right)$, lokal maksimum yapmaktadır.

$$q_{\max} = \frac{\omega_n}{\omega} = \sqrt{\frac{-(2\zeta_{\text{eq}}^2 - 1) + 2\sqrt{\zeta_{\text{eq}}^4 - \zeta_{\text{eq}}^2 + 1}}{3}} \quad (48)$$

Sonuç olarak frekans oranı için $0 \leq q \leq 5$ ve sönüm oranı için de $0.1 \leq \zeta_{\text{eq}} \leq 0.5$ seçilerek Şekil 9'da verilen grafik elde edilebilir. Bu grafik elde edilirken $\Lambda\omega^3 = 1$ teriminin sabit olduğu varsayılmıştır.

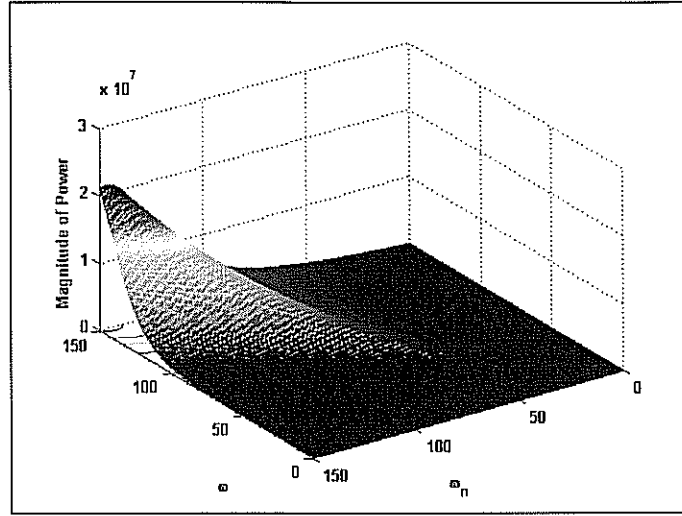
Bu grafikten de görüleceği gibi gücün büyüklüğü yaklaşık olarak $\omega_n = \omega$ civarında maksimum olmakta ve doğal frekans daha fazla arttırıldıkça azalmaktadır.



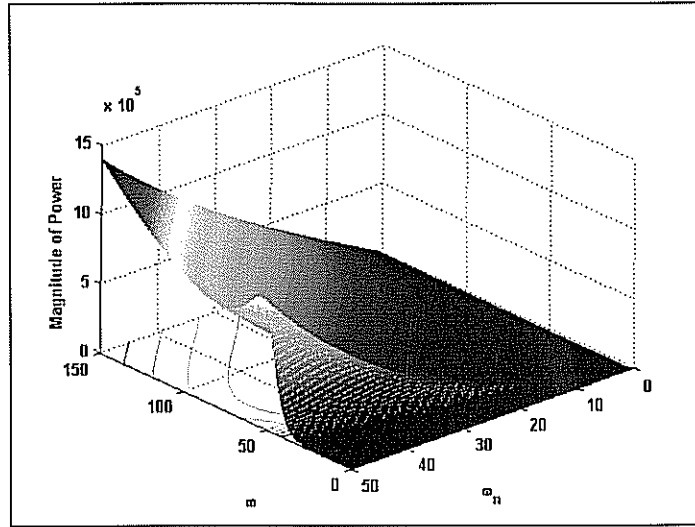
Şekil 9. Güç vs. frekans oranı, $q = \omega_n/\omega$

Doğal frekans, ω 'nın ve girdi frekansı, ω_n 'nin gücün büyüklüğünü nasıl etkiledikleri aynı anda görülmek istenirse denklem 43'te verilen ifadenin üç boyutlu grafiği Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu grafik elde edilirken ω ve ω_n , $0 \leq \omega, \omega_n \leq 150$ rad/s aralığında değiştirilmiştir ve $\zeta_{\text{eq}} = 0.2$ alınmıştır.

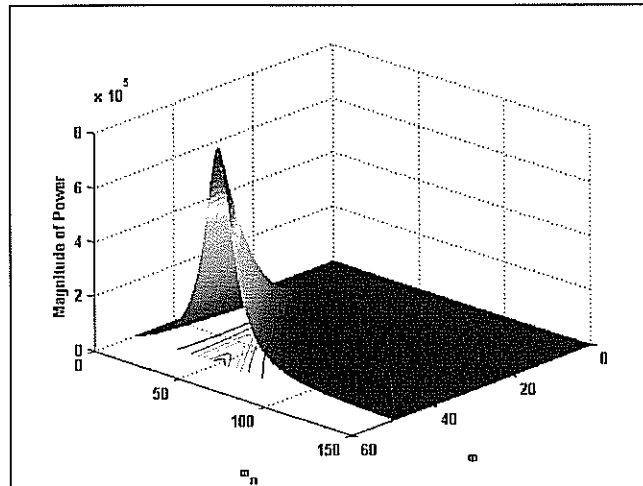
Bu grafik dikkatle incelenirse sabit bir girdi frekansı için doğal frekans arttırıldıkça gücün büyüklüğünün yaklaşık $\omega_n = \omega$ de maksimum olduğu daha sonra artan doğal frekans değerleri için düştüğü görülebilir. Ayrıca, eğer belirli bir doğal frekans kesitinde girdi frekansı arttırılsa bu defa gücün $\omega_n = \omega$ civarında lokal maksimum yaptığı fakat daha sonra ilk önce azalarak sonra da hızla artarak yükseldiği görülebilir. Bu açıklama $0 \leq \omega \leq 150$ rad/s ve $0 \leq \omega_n \leq 50$ rad/s aralığında elde edilen Şekil 11 ve $0 \leq \omega \leq 50$ rad/s ve $0 \leq \omega_n \leq 150$ rad/s aralığında elde edilen Şekil 12 incelenirse açıkça görülebilir.



Şekil 10. Gücün girdi ve doğal frekanslara bağlı 3-Boyutlu değişim grafiği @ $\zeta_{eq} = 0.2$



Şekil 11. Gücün girdi ve doğal frekanslara bağlı 3-Boyutlu değişim grafiği @ $\zeta_{eq} = 0.2$



Şekil 12. Gücün girdi ve doğal frekanslara bağlı 3-Boyutlu değişim grafiği @ $\zeta_{eq} = 0.2$

Sonuç olarak ω_n ve ω 'nın gücün büyüklüğü üzerindeki etkileri konusunda aşağıdaki yorumlar yapılabilir.

- Şekil 8 incelendiğinde $\Lambda = m_{eq} \zeta_c Y^2 \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right)$ terimi ve ω_n sabitken üretilen güç $\zeta_{eq} \gtrsim 0.25$ bölgesinde girdi frekansının karesiyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Eğer sönüm aralığı $\zeta_{eq} \lesssim 0.25$ ise o zaman üretilen güç ilk önce yaklaşık $\omega_n = \omega$ civarında yerel maksimum sonra yerel minimum yapmakta daha sonra frekans arttırıldıkça frekansın karesiyle orantılı olarak artmaktadır.
- Verilen sabit bir girdi frekansı, ω , değeri için ise doğal frekans, ω_n , arttırıldıkça gücün büyüklüğü $\omega_n = \omega$ civarında maksimum olmakta daha sonra azalmaktadır.
- Eğer sistemden maksimum güç çekilmek isteniyorsa ω_n , ω ve ζ_{eq} limitlerine bakılarak sistem ya doğal frekansa yakın bir girdi frekansında titreştirilmeli ya da girdi frekansı sistemin doğal frekansından olabildiğince büyük olmalıdır. Yukarıda verilen grafiklere bakılarak optimum güç noktası rahatlıkla belirlenebilir.

Yukarıda verilen bilgilere ek olarak mikro üretimden kaynaklanan fiziksel deplasman kısıtlar göz önüne alınarak rezonans kolun rölatif yer değişiminin incelenmesi de bu çalışma için faydalı olacaktır. Bu nedenle önceki bölümde verilen $z(t)$ ifadesi burada tekrarlanmıştır.

$$z(t) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right)^2 + \left(2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}} Y \sin(\omega t + \phi) \quad (49)$$

$z(t)$ 'nin maksimum değeri aşağıda verilen frekans değerinde oluşmaktadır,

$$\omega = \frac{\omega_n}{\sqrt{1 - 2\zeta_{eq}^2}} \quad (50)$$

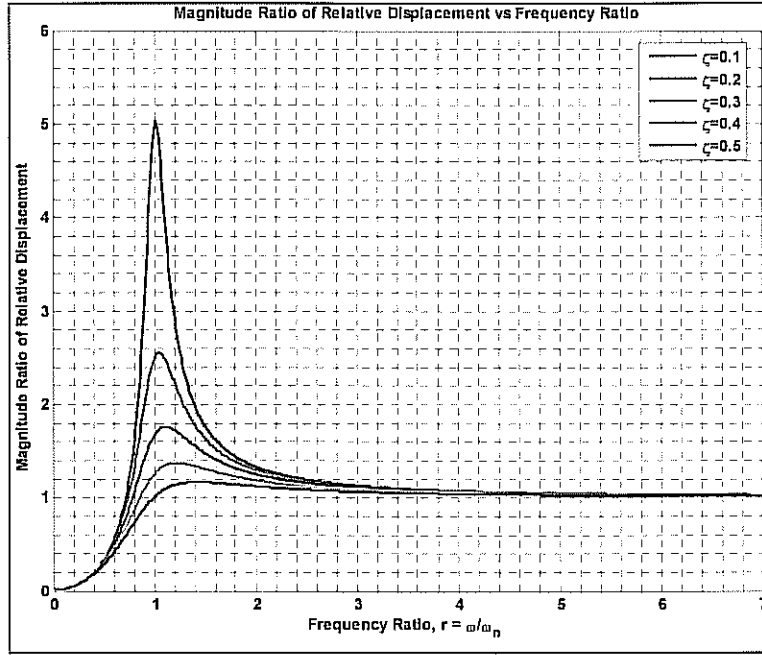
$z(t)$ 'nin maksimum olduğu değer, denklem 50, denklem 48'de kullanılarak bulunabilir,

$$z_{max} = \frac{Y}{2\zeta_{eq} \sqrt{1 - \zeta_{eq}^2}} \quad (51)$$

Rölatif yer değişim oranı denklem 49'da verilen ifade kullanılarak bulunabilir,

$$\frac{Z}{Y} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (52)$$

Girdi yer değişim büyüklüğü Y'nin sabit olduğu kabul edilerek Şekil 13'de verilen yer değişim oranının frekansa bağlı grafiği çizilebilir. Bu grafiğe bakıldığında yaklaşık rezonans civarında bu oranın maksimum olduğu yüksek frekans değerleri için ise bu değerin bir olduğu gözlenmektedir. Bu sonuca göre yeterince büyük frekans değerlerinde rezonans yapının rölatif yer değişim büyüklüğü girdi büyüklüğü ile aynı olacaktır.



Şekil 13. Yer değişim oranının frekans oranına bağlı değişimi

Elektriksel ve Mekanik Sönüm Oranlarının Üretilen Güç Üzerindeki Etkileri

Bir önceki bölümde güç denklemi aşağıda verildiği gibi elde edilmişti,

$$P(t) = \left(\frac{R_L}{R_L + R_c}\right) \frac{m_{eq} \zeta_e \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 \omega^3 Y^2}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (53)$$

Yukarıda verilen denklemde eşdeğer sönüm oranı elektriksel ve mekanik sönüm oranlarının toplamıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$\zeta_{eq} = \zeta_m + \zeta_e \quad (54)$$

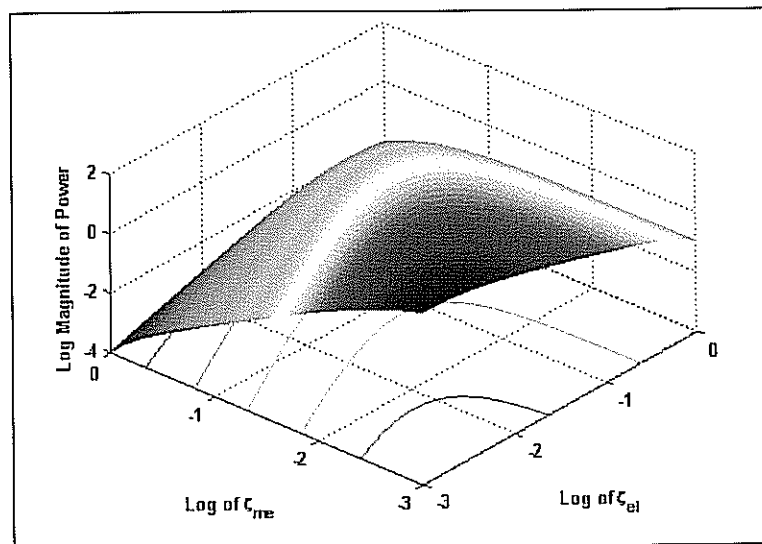
Bir önceki bölümde eğer doğal frekansın ve girdi frekansının üst limitleri eşit ise o zaman maksimum gücün aşağıdaki ifadede verilen noktada olacağı gösterilmişti,

$$q_{max} = \frac{\omega_n}{\omega_{UL}} = \sqrt{\frac{-(2\zeta_{eq}^2 - 1) + 2\sqrt{\zeta_{eq}^4 - \zeta_{eq}^2 + 1}}{3}} \quad (55)$$

Yukarıdaki ifadede ω_{UL} , girdi frekansının üst sınırıdır. Denklem 53, denklem 55 ile verilen q_{max} oranı kullanılarak yazılırsa aşağıdaki formda gösterilebilir.

$$|P(t)| = \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) \frac{m_{eq} \zeta_e (q_{max}) \omega_{max}^3 Y^2}{((q_{max})^2 - 1)^2 + (2(\zeta_m + \zeta_e) q_{max})^2} \quad (56)$$

Sonuç olarak Şekil 14'de güç ifadesinin elektriksel ve mekanik sönüm oranlarına göre 3-boyutlu log-log değişim grafiği gösterilmiştir. Bu grafik elde edilirken $K = m_{eq} \omega_{max}^3 Y^2 \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right)$ teriminin sabit olduğu varsayılmıştır. Ayrıca sönüm oranları $0.001 \leq \zeta_e, \zeta_m \leq 1$ aralığında değiştirilmiştir. Bu grafikteki güç değerleri elde edilirken her bir (ζ_e, ζ_m) noktası için denklem 56 kullanılarak maksimum güç hesaplanmıştır. Dolayısıyla bu grafikte noktaların her biri aslında yerel maksimum güç noktalarını göstermektedir.



Şekil 14. 3D Güç vs ζ_e ve ζ_m

Yukarıdaki grafikten aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir,

- Maksimum güç yaklaşık olarak $\zeta_c \cong \zeta_m$ değerlerinde ve bu değerlerin olabildiğince düşük olduğu yerlerde elde edilmektedir.
- Gücün büyüklüğü mekanik sönüm oranı arttıkça hızla düşmekte ve özellikle mekanik sönüm oranının elektriksel sönüm oranına göre büyük olduğu noktalarda daha kötü etkilenmektedir.
- Elektriksel sönüm oranının nispeten yüksek olduğu noktalarda, mekanik sönüm oranı arttırılsa dahi gücün büyüklüğü fazla düşmemektedir.

Yukarıdaki maddelere bakılarak, gücün maksimize edilmesi için ilk planda sönüm oranlarının birbirine yakın tutulması, eğer bu mümkün değilse elektriksel sönüm oranının mekanik sönüm oranına göre olabildiğince büyük olması gerektiği söylenebilir.

Tek Rezonans Kol İçin Üretilen Gücün Optimizasyonu

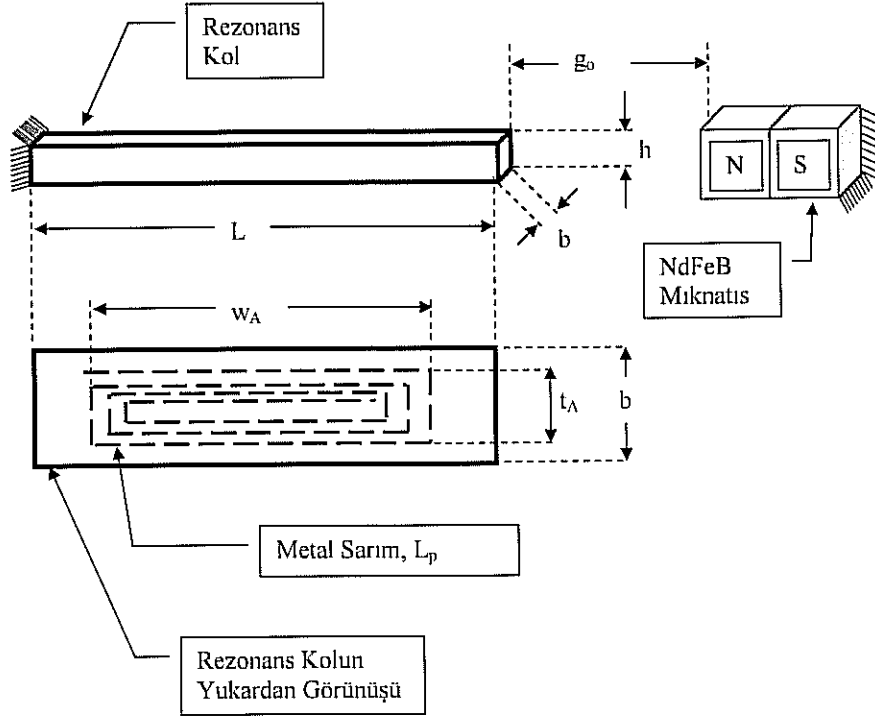
Bu bölümde amaç daha önce mekanik modeli açıklanan tek rezonans koldan üretilebilecek elektriksel gücün olabildiğince yüksek olması için kullanılması gereken sistem parametrelerinin hesaplanmasıdır. Bu amaçla Matlab® ortamında bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Algoritma, mekanik yapının maksimum hacim, uzunluk, genişlik ve deplasman gibi fiziksel kısıtlarını da göz önüne alarak, belirli bir girdi frekansında optimum sistem parametrelerinin hesaplamaktadır. Bu çalışmanın ilk aşamasında güç fonksiyonu üzerinde doğrudan eğim taraması yapan algoritmalar kullanılmış fakat fonksiyondaki yerel minimumların fazla olması sebebiyle sağlıklı sonuçlar elde edilememiştir. Bu nedenle daha sonra algoritmanın şu anki halinin temeli olan "genetic" ve "pattern search" algoritmaları kullanılarak optimizasyon çalışması yürütülerek sağlıklı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışma "Parylene" ve "Silikon" malzemeleri ve hava/vakum ortamları için ayrı ayrı yürütülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bir önceki bölümde elektriksel güç ifadesinin büyüklüğü sistem parametreleri kullanılarak aşağıdaki gibi yazılmıştı.

$$|P(t)| = \left| \frac{1}{2} \left(\frac{(BL_p)^2}{R_L + R_c} \right) \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) \left(\frac{(m_{eq} Y)^2 \omega^6}{(k_{eq} - m_{eq} \omega^2)^2 + (\omega(b_c + b_m))^2} \right) \right| \quad (57)$$

Yukarıda verilen ifadedeki parametrelerin tanımları için önceki bölümlere bakılabilir. Ayrıca bu denklemdaki bazı parametreler birbirleriyle ilişkilidir fakat anlatım kolaylığı göz önüne alınarak bu ilişkileri içeren ifadeler burada gösterilmemiştir. Denklem 57 optimizasyon algoritmasında amaç fonksiyonu ve rezonans kol ile ilgili parametreler de optimizasyon parametreleri olarak kullanılmıştır. Bu parametreler kolun uzunluğu, genişliği ve kalınlığı ile sarım uzunluğu ve direncidir. Bunun yanında bu fiziksel kısıtlar düşünülerek bu parametrelere üst ve alt limitler konulmuştur. Ayrıca rezonans kolun serbest ucundaki rölatif yer değişim de kullanılan malzeme türüne göre kısıtlanmıştır.

Elde edilen sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Bu tabloda maksimum güç için "Parylene" kullanılması durumunda optimizasyon sonuçlarını göstermektedir. Ayrıca Şekil 15'de optimizasyon algoritmasında kullanılan fiziksel sistem parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 15. Optimizasyonda kullanılan sistem parametreleri

Tablo 2. Parylene malzeme için optimizasyon sonuçları

Çalışma Ortamı	Vakum	Hava
Salınım frekansı	3.4 kHz	3.4 kHz
Giriş deplasmanı	1 μm	1 μm
Mıknatis tipi	NdFeB (1.18 T)	NdFeB (1.18 T)
Mıknatis boyutları	6 x 6 x 6 mm ³	6 x 6 x 6 mm ³
Mikroçip boyutları	9.5 x 8 x 6 mm ³	9.5 x 8 x 6 mm ³
Kol boyutları	890 x 670 x 12 μm^3	890 x 670 x 12 μm^3
Kol doğal frekansı	3.4 kHz	3.4 kHz
Kol band genişliği	140 Hz	140 Hz
Kol sayısı	20	20
Kolların sönümlenme katsayısı	0.005	0.020
Kol-mıknatis uzaklığı	500 μm	500 μm
Manyetik alan yoğunluğu	0.24 Tesla	0.24 Tesla
Sarım metal genişliği	10 μm	10 μm
Sarım metal kalınlığı	0.1 μm	0.1 μm
Sarım direnci	680 Ohm	680 Ohm
Sarım Sayısı	16	16
Etkin sarım uzunluğu	5.8 mm	5.8 mm
Toplam çıkış voltajı (20 kol)	57.6 mV (2.88 mV/kol)	14.4 mV (0.72 mV/kol)

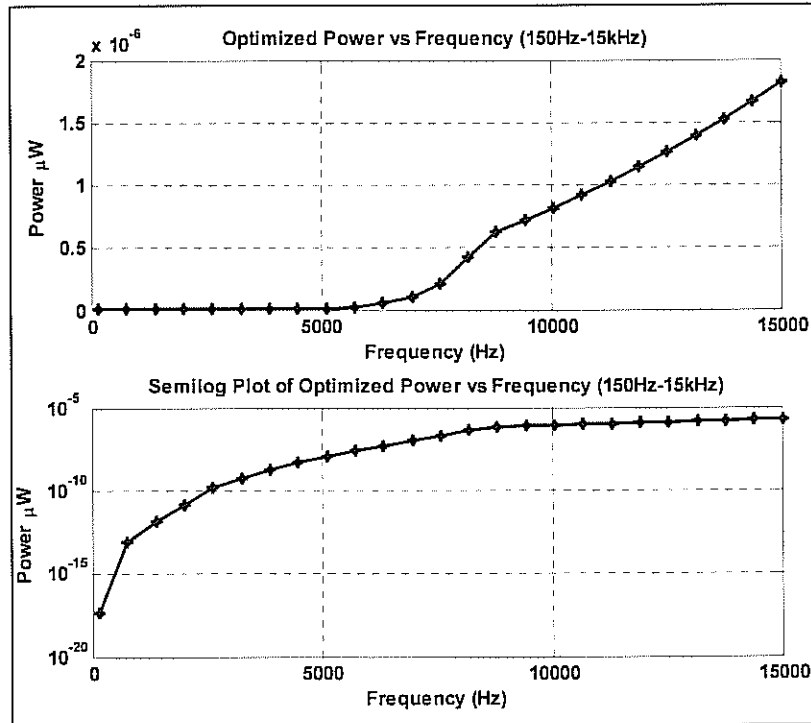
Frekans Çevirimi Yöntemi ve Matematiksel Modellemesi

Bu çalışmanın temel amacı daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi elektromanyetik enerji toplayıcılarının düşük frekanslarda da yüksek güç üretebilmesini sağlayacak bir yöntem geliştirmek ve kullanmaktır. Bu nedenle proje yürütücüsünün Michigan'da doktora sonrasında yaptığı bir araştırmada geliştirdiği "Frekans çevirimi" yöntemi bu çalışmanın asıl başlangıç noktası olmuştur.

Frekansın üretilen güç üzerindeki etkisini göstermek amacıyla Şekil 16'da geleneksel yöntemlerle elde edilen ve optimize edilmiş güç değerlerinin frekansa bağlı değişimi gösterilmiştir.

Bu şekilde üstteki grafik güç-frekans değerlerinin lineer grafiği, alttaki grafik ise aynı güç-frekans değerlerinin yarı-log grafiğidir. Genelde ortamda bulunan çevresel frekanslar 1-100 Hz arasında olup Şekil 16'e bakıldığında bu aralıkta geleneksel yöntemlerle tek rezonans koldan elde edilen güç seviyeleri (1nW) bir mikro-sistemi çalıştırabilecek değerlerin (10–1000 μ W) fazlasıyla altındadır.

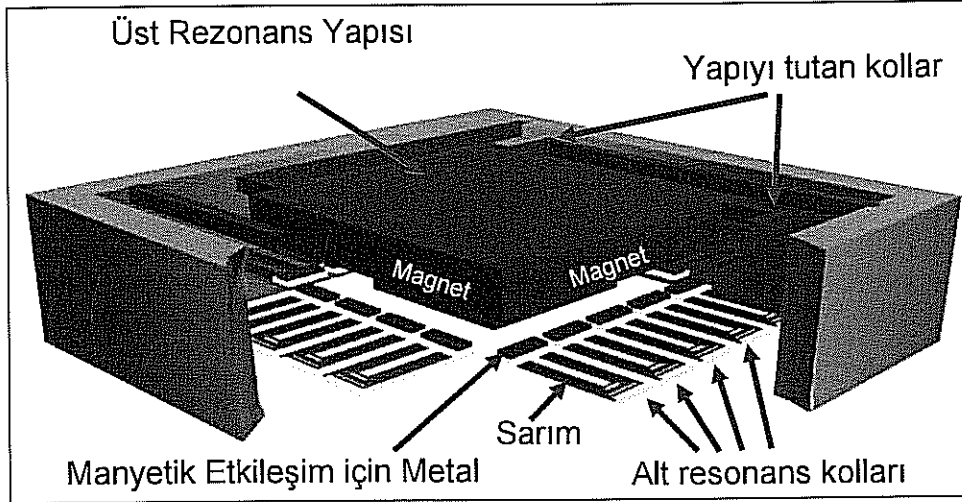
Frekans çevirimi yöntemi kullanılarak ve daha sonra benzetim çalışmalarıyla da gösterileceği gibi, 1–100 Hz aralığındaki çevresel titreşimden ve tek rezonans kol kullanılarak yeterli seviyede güç üretilmesi beklenmektedir.



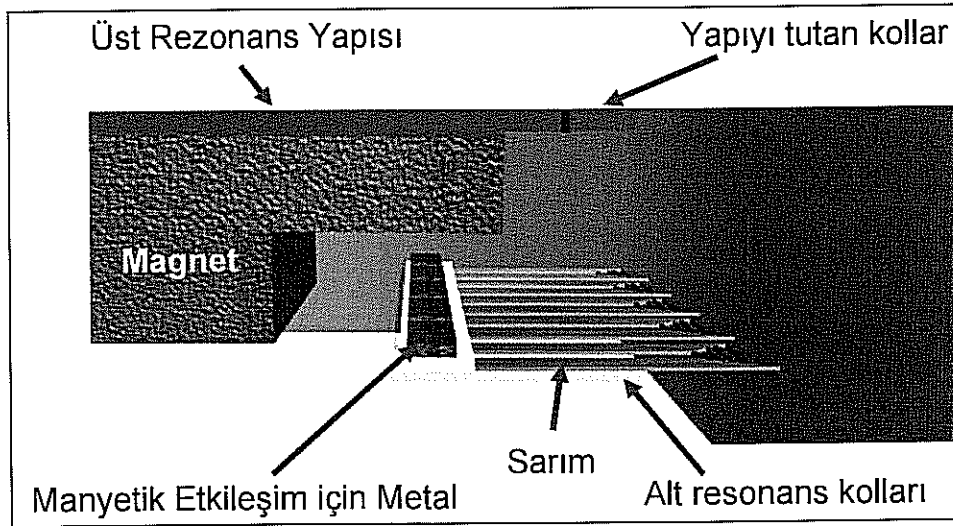
Şekil 16. Optimize edilmiş güç değerlerinin frekansa bağlı değişim grafiği

Frekans çevirimi yönteminde kullanılan mekanik yapı Şekil 17'te gösterilmiştir. Bu yapıda iki ayrı rezonans frekansında salınan yapı yer almaktadır. Üst kısımdaki yapı, yumuşak kollarla asılı halde duran ağır bir kütle olup rezonans frekansı 1-100Hz arasında istenen bir değere ayarlanmıştır.

Başka bir deyişle, ortamdaki en ufak bir sarsıntı bu kütlenin salınımına neden olmaktadır. Bu kütlenin üzerinde iki ayrı NdFeB tipi mıknatıs yer almaktadır. Mıknatıslardan biri altta yer alan rezonans kollarını (cantilevers) etkilemek, diğeri ise bu rezonans yapılarının üzerinde yer alan sarımlar üzerinde voltaj üretmek içindir. Şekil 18'de alt rezonans kolları detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 17. Frekans çevirimi yönteminde kullanılan mekanik yapı

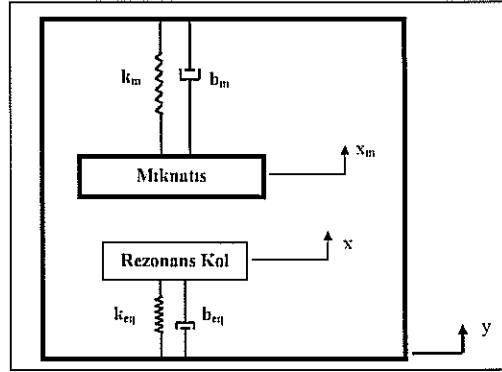


Şekil 18. Alt rezonans kolların yakından görünümü

Altta yer alan rezonans kolları (cantilevers) daha yüksek rezonans frekansına sahip olup (1-15kHz), üst kısımlarında elektromanyetik indüksiyon için metal sarımlar ve manyetik etkileşim için ferromanyetik metal taşımaktadır. Üst kısımdaki rezonans yapı salınmaya başladıktan sonra alttaki rezonans kollarına yaklaşılarak belli bir mesafede bu kolları yukarı doğru çeker. Salınımın ileriki safhasında üst rezonans yapı uzaklaşırken alttaki rezonans kollarını bırakır ve bundan sonra rezonans kolları kendi rezonans frekanslarında salınmaya başlar. Bu sayede mekanik olarak

çevresel salınım frekans transferi sağlanmış olur. Burada iki rezonans yapının birbirini yakalama ve bırakma mesafesi tasarım için kritik önem taşımakta ve ANSYS® ve MATLAB® benzetim çalışmaları ile hesaplanmaları gerekmektedir. Yüksek frekansta salınmaya başlayan rezonans kolları üzerindeki sarımlarda da voltaj üretilmiş olur. Bu yapıda rezonans kolları seri bağlanarak üretilen voltajın değerinin artırılması mümkündür. Bu sistemdeki mantık pilsiz çalışan mekanik kol saatlerindeki enerji üretim mantığına benzetilebilir. Bu tip saatlerde de en ufak bir kol hareketi ile eksenin etrafında dönmeye başlayan büyük bir kütle vardır. Kütle hareket enerjisi bir sarmal yay üzerinde depolanarak saatin çalıştırılması için kullanılır.

Bu yapı ile ilgili benzetim çalışmaları yürütülmeden önce sistemin dinamik modelinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 19'da yukarıda açıklanan yapının tek rezonans kol için eşdeğer mekanik modeli gösterilmiştir.



Şekil 19. Eşdeğer mekanik model

Yukarıda gösterilen yapı ortamda varolan titreşim, y , ile etkileştirilmekte ve bunun sonucunda büyük mıknatis x_m ile salınmaktadır. Bu hareket sonucunda rezonans kol mıknatis tarafından yakalanıp bırakılmakta ve kendisine verilen pozisyon ilk değeri ile kendi rezonans frekansında salınmaktadır. Burada ortamdaki titreşim frekansı rezonans kolun rezonans frekansından çok düşük olduğundan, rezonans kolu ayrıca etkilememektedir. Mıknatis ile ilgili dinamik model daha önceki bölümlerde aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$m_m \ddot{z}_m + b_m \dot{z}_m + k_m z_m = -m_m \ddot{y} \quad (58)$$

Ayrıca yukarıdaki modele, manyetik çekim kuvveti mıknatisin dinamiğini etkilemeyeceğinden dolayı eklenmemiştir. Sistem kararlı durumdayken mıknatis aşağıda verilen dinamik modele uygun hareket edecektir.

$$z_m(t) = \left| \frac{m_m \omega^2 Y}{-m_m \omega^2 + j\omega b_m + k_m} \right| \sin(\omega t + \varphi) \quad (59)$$

Bu denklemdeki faz açısı aşağıdaki ifadeyle gösterilebilir,

$$\varphi = -\tan^{-1} \left(\frac{\omega b_m}{k_m - m_m \omega^2} \right) = -\tan^{-1} \left(\frac{2\zeta_m \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right) \quad (60)$$

Denklem 58'den 60'a kadar verilen ifadelerde,

z_m : Mıknatısın rölatif yer değiştirmesini,

m_{eq} : Mıknatısın eşdeğer kütesini,

k_{eq} : Mıknatısın eşdeğer yay sabitini,

b_{eq} : Mıknatısın eşdeğer sönüm sabitini ifade etmektedir.

Rezonans kol ile ilgili matematiksel ifadeler ise denklem 58'de verilen ifade ile aynıdır fakat daha önce belirtildiği gibi ortam salınımlarının frekansı rezonans yapının doğal frekansının çok altında olduğundan dış ortam etkisi matematiksel modelde gösterilmeyecektir. Bu durumda rezonans kolun dinamik modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$m_{eq} \ddot{z} + b_{eq} \dot{z} + k_{eq} z = 0 \quad (61)$$

Yukarıdaki denklemde, m_{eq} , k_{eq} ve b_{eq} rezonans kol ile ilgili eşdeğer parametrelerdir ve elektromanyetik kuvvet, F_e , eşdeğer sönüm sabiti, b_{eq} 'in içinde ifade edilmiş olup elektriksel sönüm sabiti, b_e 'den elde edilmesi basamakları önceki bölümlerde gösterilen basamaklarla aynı olduğundan burada tekrarlanmayacaktır.

Denklem 61'in $z(0) = z_0$, $\dot{z}(0) = 0$ ilk koşulları da göz önüne alınarak Laplace dönüşümü alınırsa ve daha sonra ters Laplace dönüşümüyle $z(t)$ için çözümlerse rezonans kolun deplasmanı için aşağıdaki ifade elde edilebilir,

$$z(t) = z_0 \omega_n \frac{e^{-\zeta_{eq} \omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta_{eq}^2}} \left(\zeta_{eq} \sin(\omega_d t) + \sqrt{1 - \zeta_{eq}^2} \cos(\omega_d t) \right) \quad (62)$$

Yukarıdaki denklemin türevi alınarak kolun hız ifadesine ulaşılabilir,

$$\dot{z}(t) = -z_0 \omega_n \frac{e^{-\zeta_{eq} \omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta_{eq}^2}} \sin(\omega_d t) \quad (63)$$

Sonuç olarak sadece ön koşullar göz önüne alındığında,

$$P = \frac{1}{2} b_c \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) \dot{x}^2 \quad (64.a)$$

ifadesi kullanılarak anlık güç denklemi aşağıdaki gibi bulunur,

$$P = \frac{1}{2} b_c \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) \left[x_0 \omega_n \frac{e^{-\zeta_{eq} \omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta_{eq}^2}} \sin(\omega_d t) \right]^2 \quad (65.b)$$

Rezonans yapının sönüm oranı ve doğal frekansı kullanılarak ve $b_c = 2m_{cq} \zeta_c \omega_n$ eşitliğinin 65.b'ye yerleştirilerek güç ifadesi aşağıdaki gibi de yazılabilir,

$$P = \left(\frac{R_L}{R_L + R_c} \right) m_{cq} \zeta_c \omega_n^3 \left[x_0^2 \frac{e^{-2\zeta_{eq} \omega_n t}}{(1 - \zeta_{eq}^2)} \sin^2(\omega_d t) \right] \quad (66)$$

Ayrıca denklem 62'den 66'ya kadar verilen ifadelerde kullanılan ω_d rezonans kolun sönümlü doğal frekansı olup aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

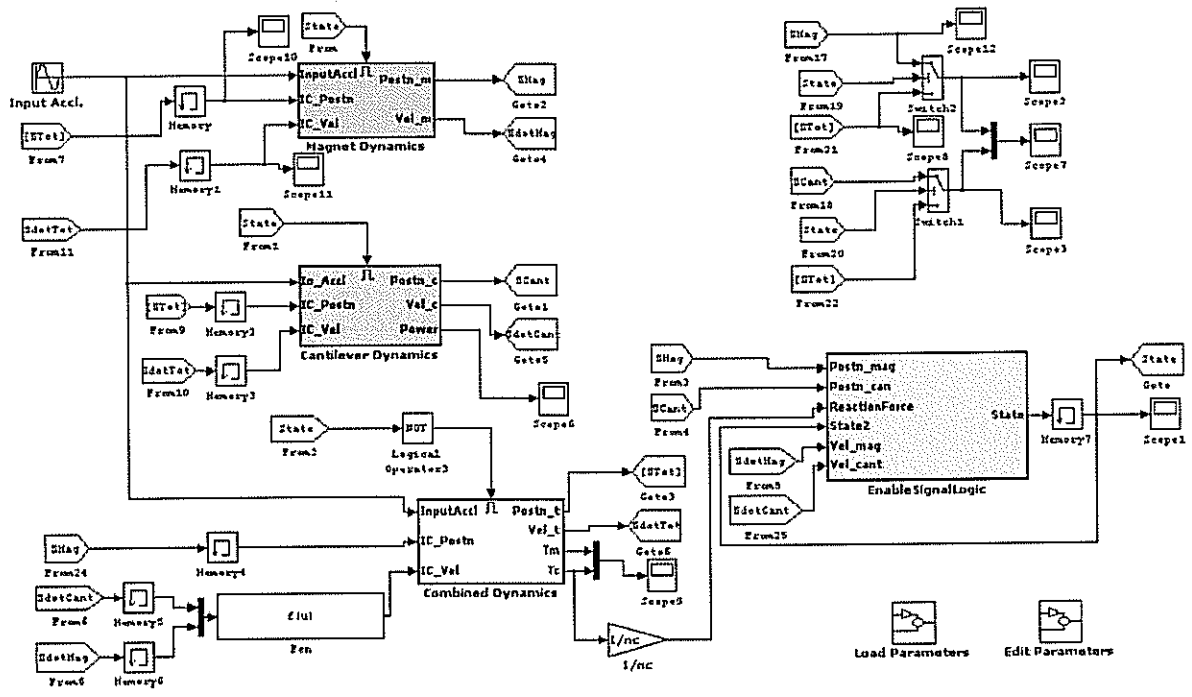
$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta_{eq}^2} \quad (67)$$

Frekans Çevirimi Tekniği ile İlgili Benzetim Çalışmaları

Önceki bölümde elde edilen sistem modeli kullanılarak frekans çevirimi tekniği ile ilgili benzetim çalışmaları Matlab® Simulink® ortamında yürütülmüştür. Şekil 20'de sistemin Simulink modellemesi, Tablo 3'te ise bu sistemin optimizasyon sonuçları görülmektedir.

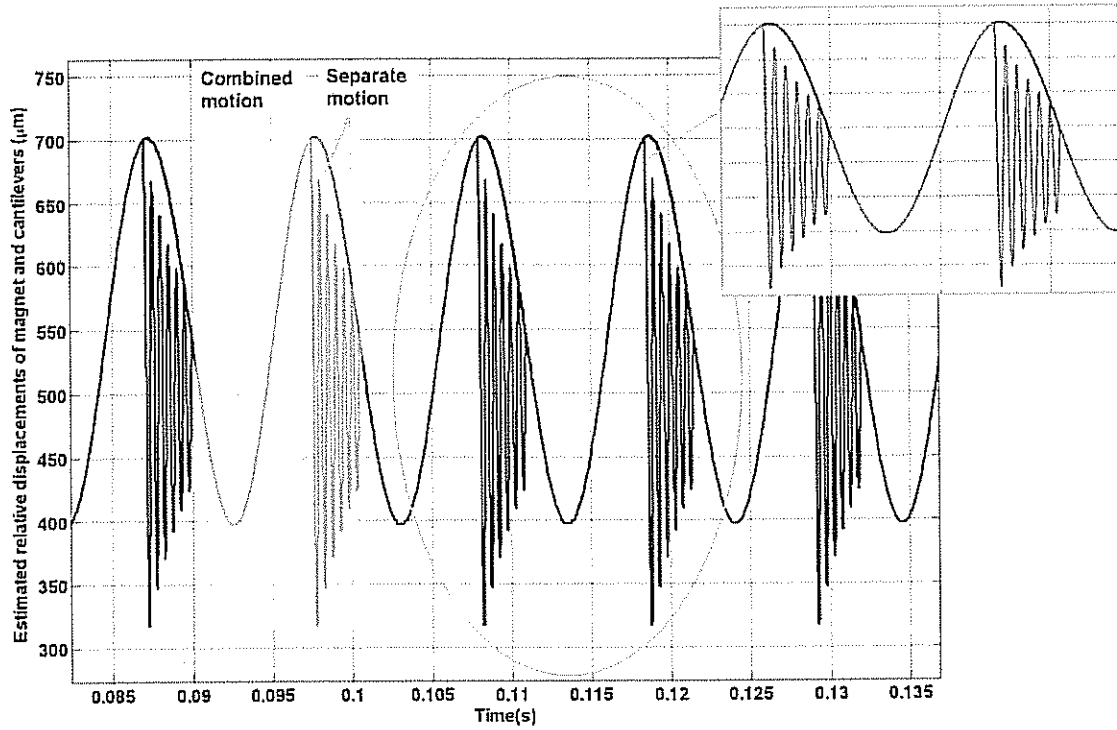
Tablo 3. Benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen parametreler

Salınım frekansı	50-200 Hz
İvme	40 g
Mıknatis tipi	NdFeB (1.18 T)
Mıknatis boyutları	3.8 x 3.8 x 1.5 mm ³
Mikroçip boyutları	8.5 x 7 x 2.5 mm ³
Kol doğal frekansı	2 kHz
Kol boyutları	1000 x 430 x 15 µm ³
Manyetik çekim alanı	430 x 225 x 9 µm ³
Manyetik çekim malzemesi	Nickel
Kol Malzemesi	Parylene C
Diyafram malzemesi	Parylene C
Diyafram kol uzunluğu	1000 µm
Diyafram kol genişliği	555 µm
Diyafram kol kalınlığı	15 µm
Toplam diyafram kol sayısı	16
Diyafram üstü mıknatis alanı	3.95 x 3.95 mm ²
Diyafram rezonans frekansı	113 Hz
Kol bırakma uzunluğu	200 µm
Etkin çalışma frekansı	50-200 Hz
Kolların sönümlenme katsayısı	0.02
Manyetik alan yoğunluğu	0.19 Tesla
Kol-mıknatis uzaklığı	500 µm
Sarım metal genişliği	20 µm
Sarım metal kalınlığı	0.1 µm
Sarım direnci	160 Ω
Etkin sarım uzunluğu	1.4 mm
Sarım Sayısı	6
Toplam çıkış voltajı (20 kol)	13.5 mV (0.67 mV/cantilever)

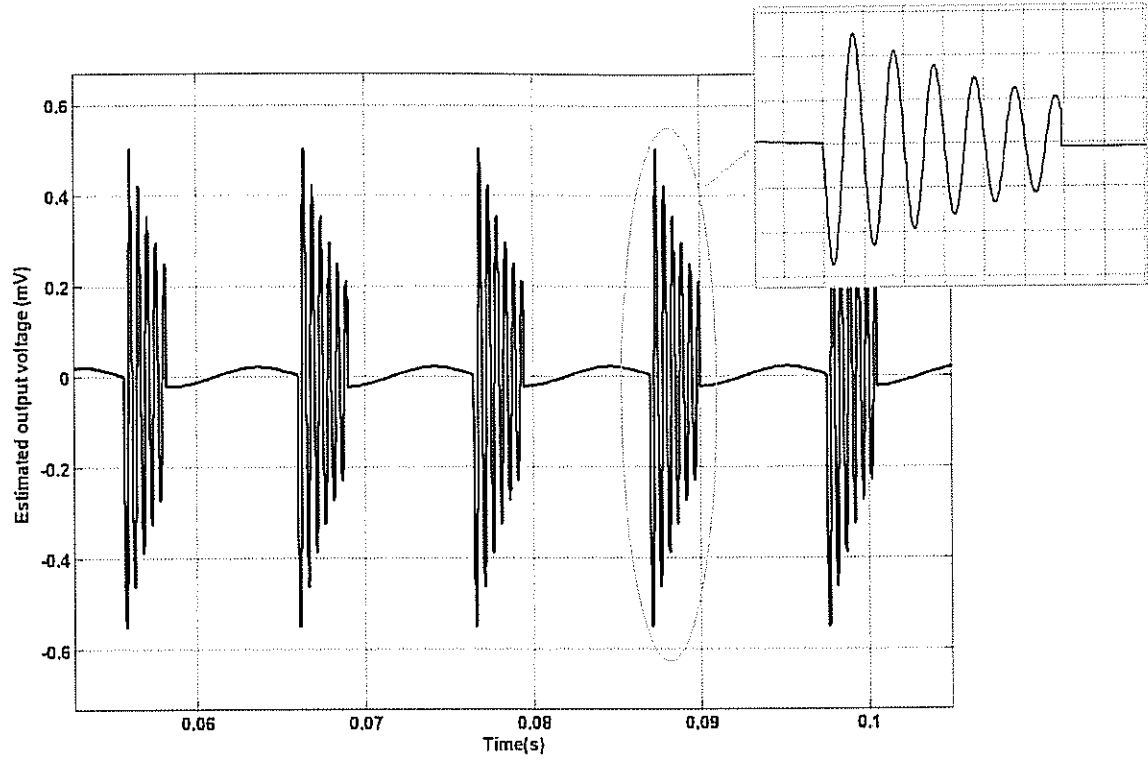


Şekil 20. Frekans çevrimi tekniği için simulink modeli

Şekil 21 ve 22’de bu model kullanılarak elde edilen kol hareketi ve üretilen voltaj değerleri verilmektedir.



Şekil 21. Kol ve diyaframın birbirlerine göre hareketlerini inceleyen simulasyon sonuçları



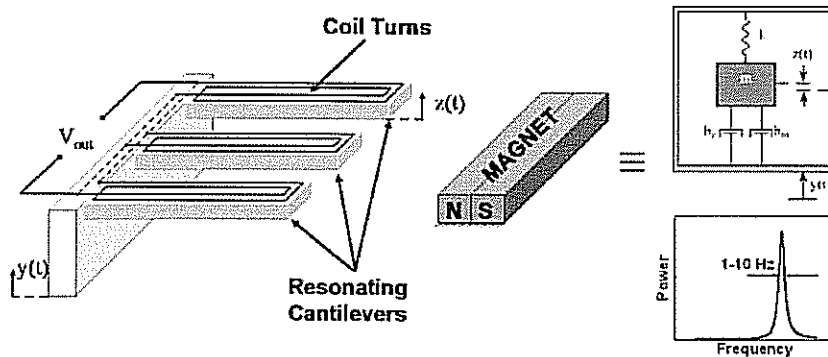
Şekil 22. Frekans çevrimi tekniğiyle elde edilebilecek voltaj çıktısı

Mikro Jeneratör Yapılarının Optimizasyonu ve Üretimi

Yapılan benzetim ve optimizasyon çalışmaları ve literatür araştırmaları göz önüne alınarak aşağıda listelenen ana modeller üretilmiştir.

- Seri rezonans kollar, (Array of cantilevers (AOC)),
- Geniş frekans bandında çalışan seri rezonans kollar (Frequency sweeping array of cantilevers (AOC_FS))
- Büyük kütle-sarım yapısı, (Large mass coil (LMC)),
- Frekans çevrimi yöntemi, (Frequency up-converter (FUC)).

Seri rezonans kol tasarımı, sabit bir mıknatısa göre göreceli olarak hareket edebilen ve üzerinde sarım bulunan bir dizi rezonans koldan oluşmaktadır ve Şekil 23'de şematik olarak gösterilmiştir^{1,2}. Bu yapı tek bir sarsıntı frekansında etkin güç üretebilmektedir ve optimize edilmiş parametreleri Tablo 4'te sunulmuştur.



Şekil 23. Seri Rezonans Kol Tasarımının Şematik Gösterimi

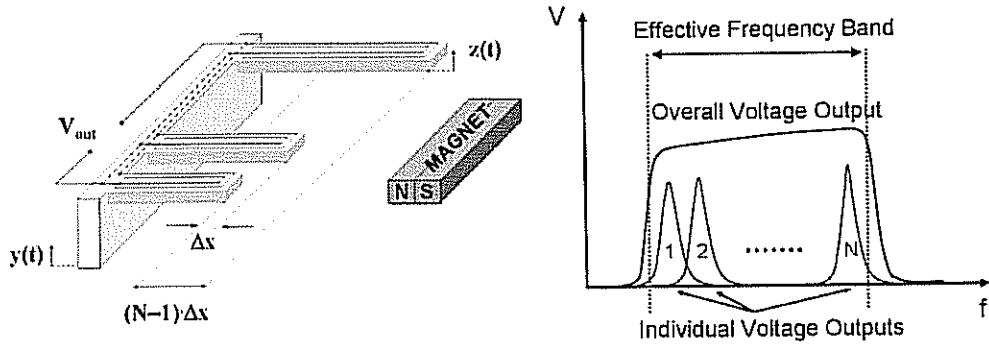
Geniş bantlı seri rezonans kol tasarımı, sabit bir mıknatısa göre göreceli olarak hareket edebilen ve üzerinde sarım bulunan bir dizi rezonans koldan oluşmaktadır ve Şekil 24'de şematik olarak gösterilmiştir^{3,4}. Bu yapının önceki yapıdan temel farkı, kolların rezonans frekanslarının birbirinde farklı tasarlanarak geniş bir frekans aralığında etkin enerji üretimini mümkün kılmasıdır. Bu tasarımın optimize edilmiş parametreleri Tablo 5'ta sunulmuştur.

¹ I. Sari, T. Balkan and H. Kulah, "Design and Optimization of an Electromagnetic Micro Energy Scavenger with Parylene Cantilevers," PowerMEMS 2007, Freiburg, Germany, pp. 81-84, November 28-29, 2007,.

² I. Sari, T. Balkan and H. Kulah, "A Micro Power Generator with Planar Coils on Parylene Cantilevers," IEEE Prime 2008, 4th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics, Istanbul, Turkey, June 22-25, 2008.

³ I. Sari, T. Balkan and H. Kulah, "A Wideband Electromagnetic Micro Power Generator for Wireless Microsystems," The 14th Int. Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS'07 & EUROSENSORS XXI), Lyon, France, vol. 1, pp. 275-278, June 10-14, 2007.

⁴ I. Sari, T. Balkan and H. Kulah, "An Electromagnetic Micro Power Generator for Wideband Environmental Vibrations," Sensors and Actuators A: Physical, doi: 10.1016/j.sna.2007.11.021, vol. 145-146 (2008), pp 405-413.

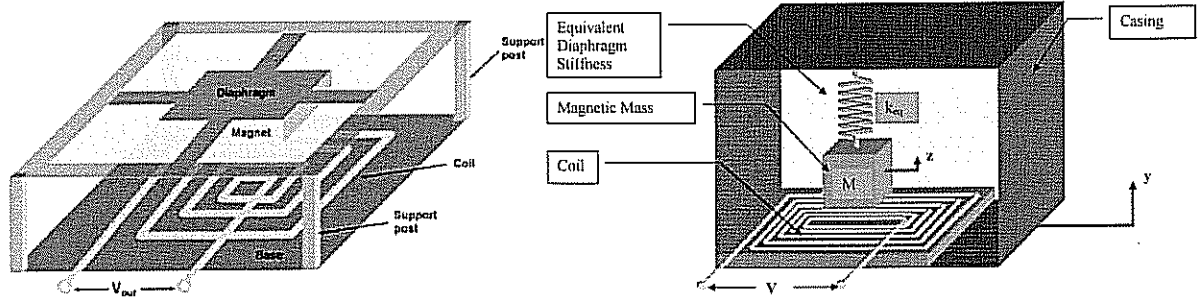


Şekil 24. Geniş bantta enerji üretebilen seri Rezonans Kol Tasarımının Şematik Gösterimi

Tablo 4. Seri Rezonans Kol Tasarımının Önemli Parametreleri

Ortam	Vakum	Hava
Salınım frekansı	3.4 kHz	3.4 kHz
Giriş deplasmanı	1 μm	1 μm
Mıknatis tipi	NdFeB (1.18 T)	NdFeB (1.18 T)
Mıknatis boyutları	6 x 6 x 6 mm ³	6 x 6 x 6 mm ³
Üreteç boyutları	9.5 x 8 x 6 mm ³	9.5 x 8 x 6 mm ³
Kol boyutları	890 x 670 x 12 μm^3	890 x 670 x 12 μm^3
Kol malzemesi	Parylene C	Parylene C
Kolların doğal frekansı	3.4 kHz	3.4 kHz
Bant genişliği	140 Hz	140 Hz
Kol sayısı	20	20
Kol sönümlenme katsayısı	0.005	0.020
Kol-Mıknatis uzaklığı	500 μm	500 μm
Manyetik alan yoğunluğu	0.24 Tesla	0.24 Tesla
Sarım metal genişliği	10 μm	10 μm
Sarım metal kalınlığı	0.1 μm	0.1 μm
Sarım direnci (tek kol)	680 Ohm	680 Ohm
Sarım sayısı	16	16
Etkin sarım uzunluğu (tek kol)	5.8 mm	5.8 mm
Toplam voltaj (20 kol)	57.6 mV (2.88 mV/cantilever)	14.4 mV (0.72 mV/cantilever)
Üretilen güç	24nW	1.5nW

Büyük kütle-sarım yapısı literatürde en çok karşılaşılan elektromanyetik jeneratör tasarımıdır. Bu tasarımda sabit bir sarım ve bu sarıma göre rölatif hareket edebilen hareketli büyük bir mıknatıs bulunmaktadır. Bu tasarım şematik olarak Şekil 25'de gösterilmiştir. Tablo 6'da bu yapının optimize edilmiş parametreleri sunulmaktadır.



Şekil 25. Büyük Kütle-Sarım Tasarımının Şematik Gösterimi

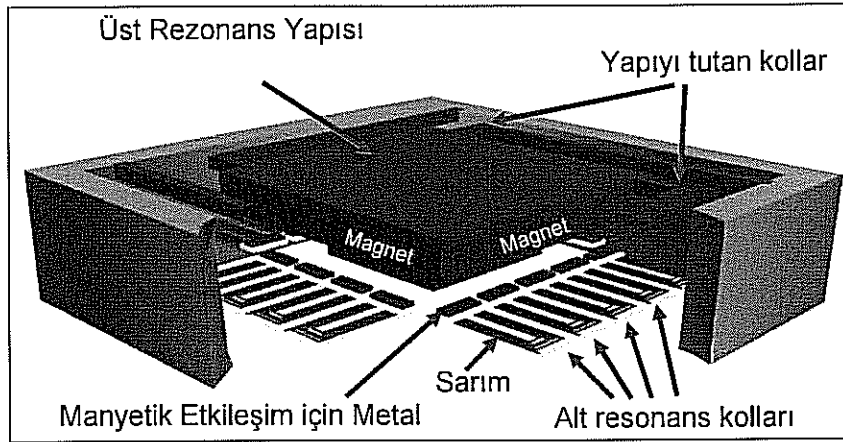
Tablo 5. Seri Rezonans Kol Tasarımının Önemli Parametreleri

Kolların doğal frekansı	3.5-4.5 kHz
Kol sayısı	40
Kol malzemesi	Parylene C
Kol boyutları	$(890-1007) \times 670 \times 15 \mu\text{m}^3$
Kol uzunluğu değişimi	3 μm
Üreteç boyutları	$14 \times 12.5 \times 8 \text{ mm}^3$
Mıknatıs tipi	NdFeB (1.18 T)
Mıknatıs boyutları	$8 \times 8 \times 8 \text{ mm}^3$
Kol-Mıknatıs uzaklığı	500 μm
Manyetik alan yoğunluğu	0.4 Tesla
Kol sönümlenme katsayısı	0.02
Sarım sayısı	10
Etkin sarım uzunluğu (tek kol)	2.9-3.0 mm
Sarım metal genişliği	20 μm
Sarım metal kalınlığı	0.1 μm
Sarım direnci (tek kol)	110 Ω
Bant genişliği	1 kHz
Toplam voltaj (40 kol)	9 mV

Tablo 6. Büyük Kütle Sarım Tasarımının Önemli Parametreleri

Salınım frekansı	113 Hz
Mıknatıs boyutları	3.8 x 3.8 x 1.5 mm ³
Diyafram malzemesi	Parylene C
Diyafram kol uzunluğu	1000 µm
Diyafram kol genişliği	555 µm
Diyafram kol kalınlığı	15 µm
Diyafram doğal frekansı	113 Hz
Sarım metal genişliği	160 µm
Sarım metal kalınlığı	0.1 µm
Sarım direnci	235 Ω
Sarım sayısı	13
Etkin sarım uzunluğu	29.7 mm
Çıkış voltajı	0.4 mV

Son olarak çalışmanın esas amacı olan frekans çevirimi yöntemi ise bir diyaframa bağlı olarak hareket edebilen bir mıknatıs ve bu mıknatısın hemen altına yerleştirilmiş olan seri rezonans kollardan oluşmaktadır^{5,6}. Seri rezonans kollar, büyük mıknatıs tarafından verilen ilk değer ile hareket etmektedir. Bu yapının şematik gösterimi Şekil 26’de sunulmuştur.



Şekil 26. Frekans Çevirimi Yönteminin Şematik Gösterimi

Frekans çevirimi yöntemi tasarımı ile ilgili optimize edilmiş parametreler Tablo 7’de sunulmuştur.

⁵ H. Kulah and K. Najafi, "An Electromagnetic Micro Power Generator for Low-Frequency Environmental Vibrations," International Conference on Microelectromechanical Systems (MEMS'04), pp. 237-240, January 2004..

⁶ H. Kulah and K. Najafi, "Energy Scavenging from Low-Frequency Vibrations by Using Frequency Up-Conversion for Wireless Sensor Applications," IEEE Sensors Journal, Vol.8, No.3, pp. 261-268, March 2008. (doi:10.1109/JSEN.2008.917125)

Tablo 7. Frekans Çevrimi Yöntemi Tasarımının Detayları

Salınım frekansı	50-200 Hz
Mıknatis tipi	NdFeB (1.18 T)
Mıknatis boyutları	3.8 x 3.8 x 1.5 mm ³
Mikroçip boyutları	8.5 x 7 x 2.5 mm ³
Kol doğal frekansı	2 kHz
Kol boyutları	1000 x 430 x 15 µm ³
Manyetik çekim alanı	430 x 225 x 9 µm ³
Kol Malzemesi	Parylene C
Diyafram malzemesi	Parylene C
Diyafram kol uzunluğu	1000 µm
Diyafram kol genişliği	555 µm
Diyafram kol kalınlığı	15 µm
Diyafram rezonans frekansı	113 Hz
Kol bırakma uzaklığı	200 µm
Etkin çalışma frekansı	50-200 Hz
Kolların sönümlleme katsayısı	0.02
Manyetik alan yoğunluğu	0.19 Tesla
Kol-mıknatis uzaklığı	500 µm
Sarım metal genişliği	20 µm
Sarım metal kalınlığı	0.1 µm
Sarım direnci	160 Ω
Etkin sarım uzunluğu	1.4 mm
Sarım Sayısı	6
Toplam çıkış voltajı (20 kol)	13.5 mV (0.67 mV/cantilever)

Mikro Jeneratörlerin Üretim Aşamaları

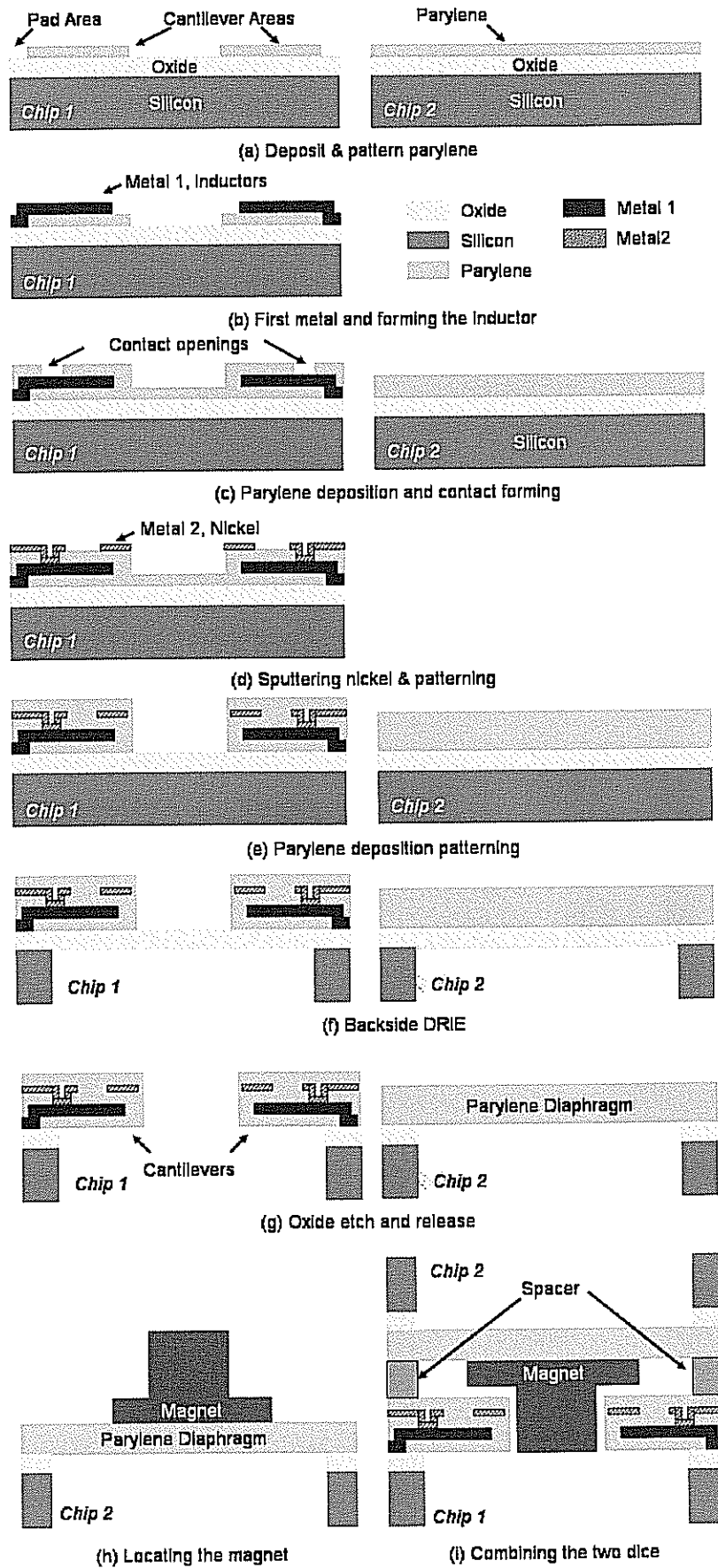
Bu bölümde önerilen mikro jeneratör yapıları için tasarlanmış olan üretim aşamaları açıklanmaktadır. Üretimde çok önemli bir yeri olan parylene kaplama cihazı, projenin ilk altı aylık döneminde satın alınarak ODTÜ – MET tesislerinde kurulmuştur.

Tasarımı ve serimi yapılan tüm modeller silisyum pulu üzerinde aynı anda ve tek seferde üretildiğinden, tüm tasarımlar için üretim akışı aynıdır. Bu nedenle burada en karmaşık yapı olan frekans çevirimi yönteminin üretim aşamaları açıklanacaktır.

Şekil 27’de planlanan üretim aşamaları gösterilmektedir. Mikro jeneratör yapısı iki ayrı çip olarak geliştirilmiş ve iki çip de aynı silisyum pul üzerinde sadece 5 maske kullanılarak üretilmiştir. Bu maskelerin isimleri ve amaçları aşağıda açıklanmıştır.

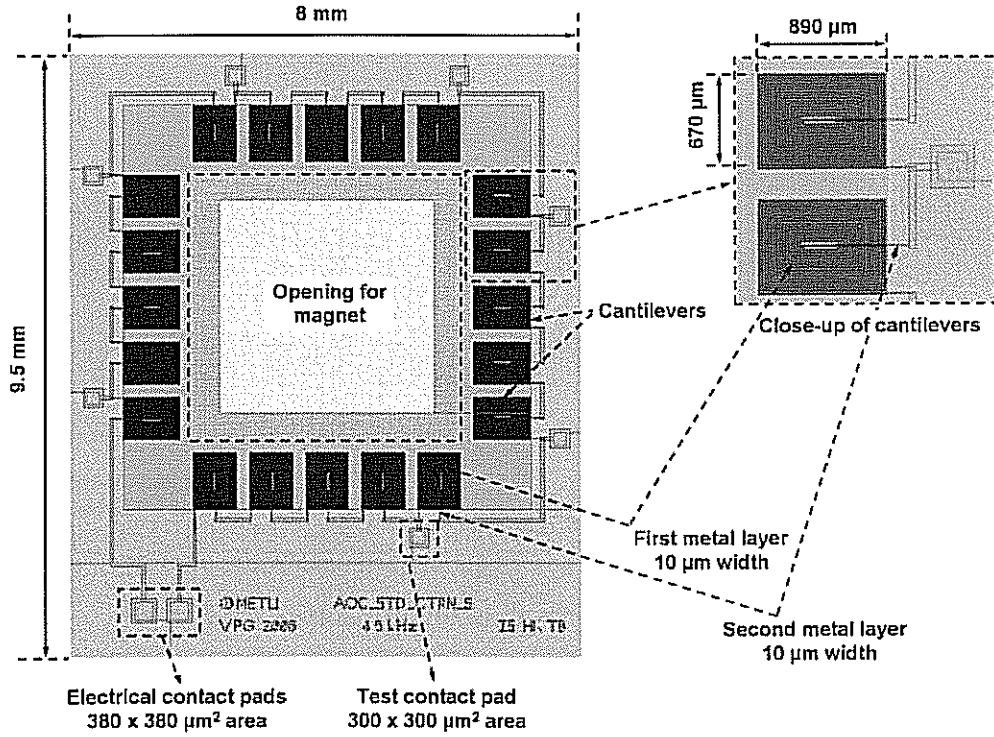
- **Kol Maskesi:** Parylene rezonans kolların üretimi
- **Sarım Maskesi:** Metal sarımların oluşturulması
- **Elektriksel Kontak Maskesi:** Parylene kolların gerekli alanlarının aşındırılarak elektriksel temas ve aktarım noktalarının oluşturulması
- **Elektriksel Bağlantı Maskesi:** Elektriksel devrenin tamamlanması için gerekli olan ikinci metal katmanının oluşturulması
- **Pul Arkası DRIE Aşındırma Maskesi:** Çiplerin arka taraftan aşındırılarak serbest bırakılması

İlk olarak elektriksel yalıtımın sağlanması amacıyla silisyum pul oksitlendirilir. Daha sonra silisyum oksit (SiO_2) üzerine $1 \mu\text{m}$ kalınlığında parylene kaplanarak rezonans kol yapıları belirlenir (Şekil 27.a). Parylene üzerine altın gibi elektriksel iletkenliği yüksek Metal 1 kaplanarak şekillendirilerek sarımların oluşturulması sağlanır (Şekil 27.b). Bir sonraki adımda, Metal 1 üzerine $1 \mu\text{m}$ kalınlığında ikinci bir parylene katmanı oluşturulur. İkinci parylene katmanının amacı Metal 1 ve bir sonraki adımda kaplanacak Metal 2 arasındaki yalıtımın sağlanmasıdır (Şekil 27.c). Metal 2 ve Metal 1 arasındaki bağlantı noktalarının açılmasından sonra Nikel gibi ferromanyetik bir metal, Metal 2 olarak şekillendirilir (Şekil 27.d). Metal 2’nin ferromanyetik bir madde olarak seçilmesinin nedeni bu metalin manyetik etkileşim için kullanılacak olmasıdır. Metal 2’den sonra $13 \mu\text{m}$ kalınlığında son parylene katmanı döşenip şekillendirilerek rezonans kollarının kalınlığı artırılır ve bu sayede doğal frekansları belirlenir (Şekil 27.e). Daha sonra tabandaki silisyum arka taraftan DRIE ile aşındırılarak (Şekil 27.f) ve SiO_2 ’in kaldırılmasından sonra rezonans yapılar serbest hale getirilir (Şekil 27.g). Son olarak, büyük rezonans yapının üzerine mıknatıslar yerleştirilir ve silisyum yapılmış bir ayıraç kullanılarak iki çip birleştirilir (Şekil 27.h-i).

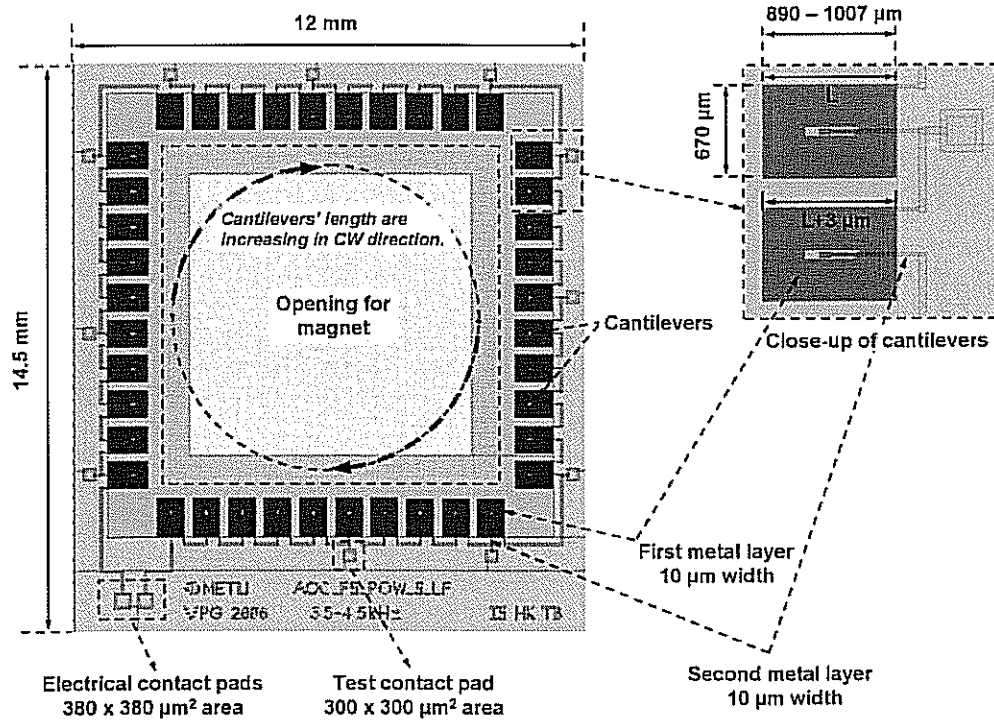


Şekil 27. Serimi Tamamlanan Modellerin Üretim Aşamaları

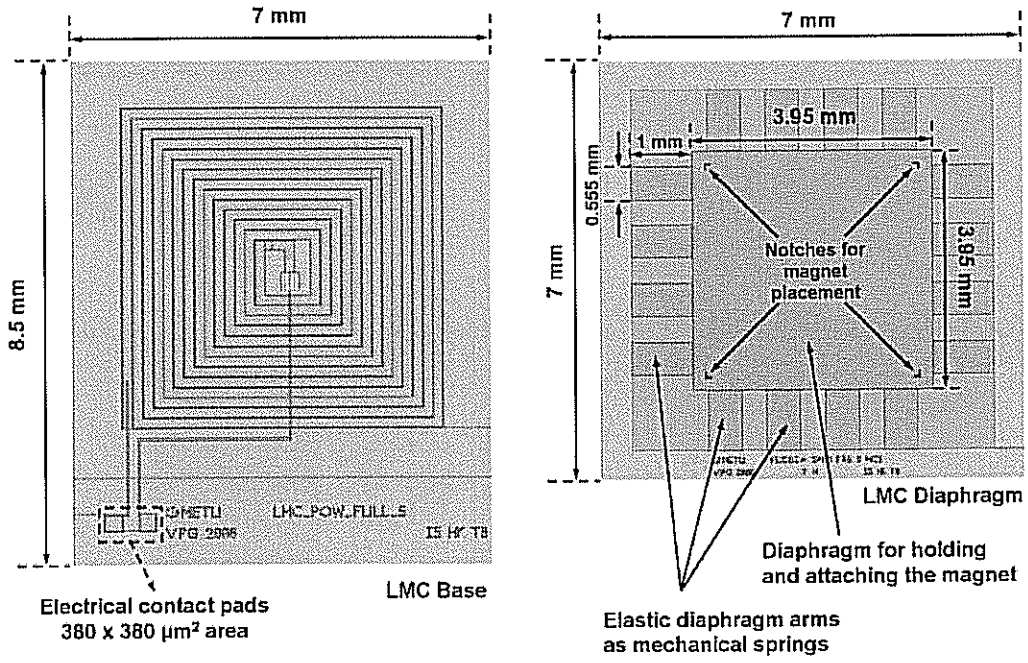
Şekil 28-31 proje kapsamında geliştirilen dört ayrı üreteç yapısının bu üretim süreci için hazırlanan serimlerini detaylı olarak göstermektedir. Şekil 32-35 üretilen çiplerin fotoğraflarını göstermektedir. Bu çiplerin teknik özellikleri önceki bölümlerde açıklanmıştır.



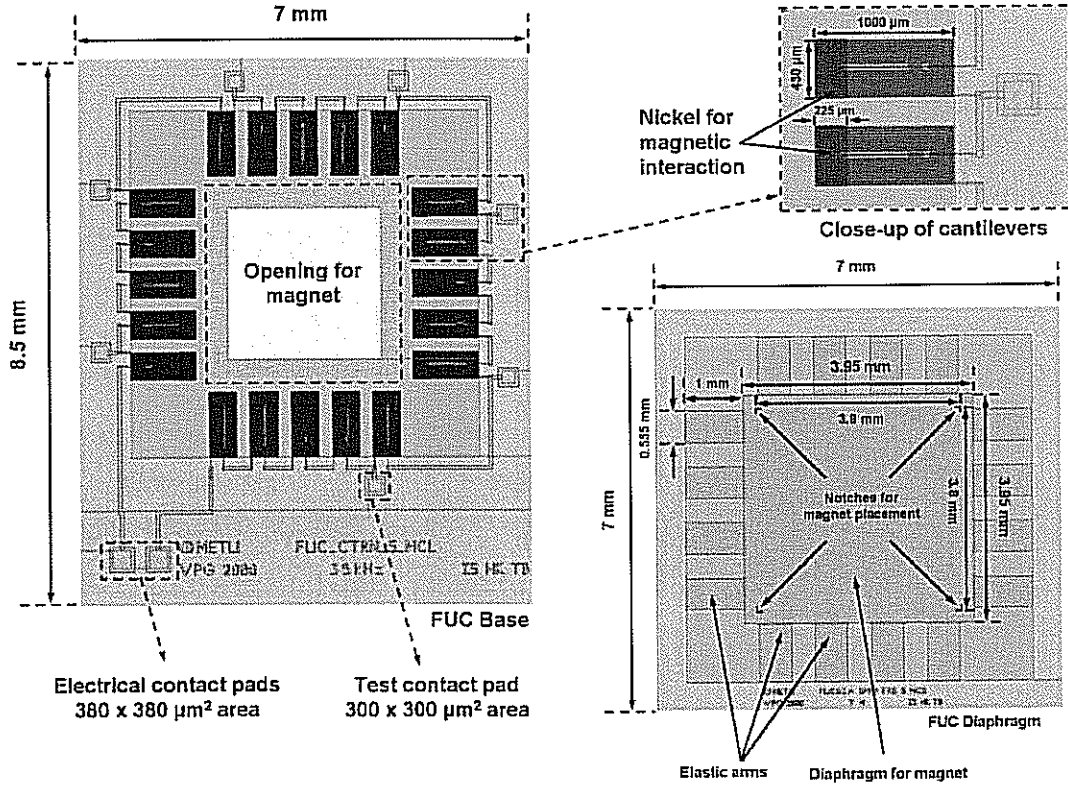
Şekil 28. Tek frekansta etkin enerji üreten seri kol tasarımının serimi



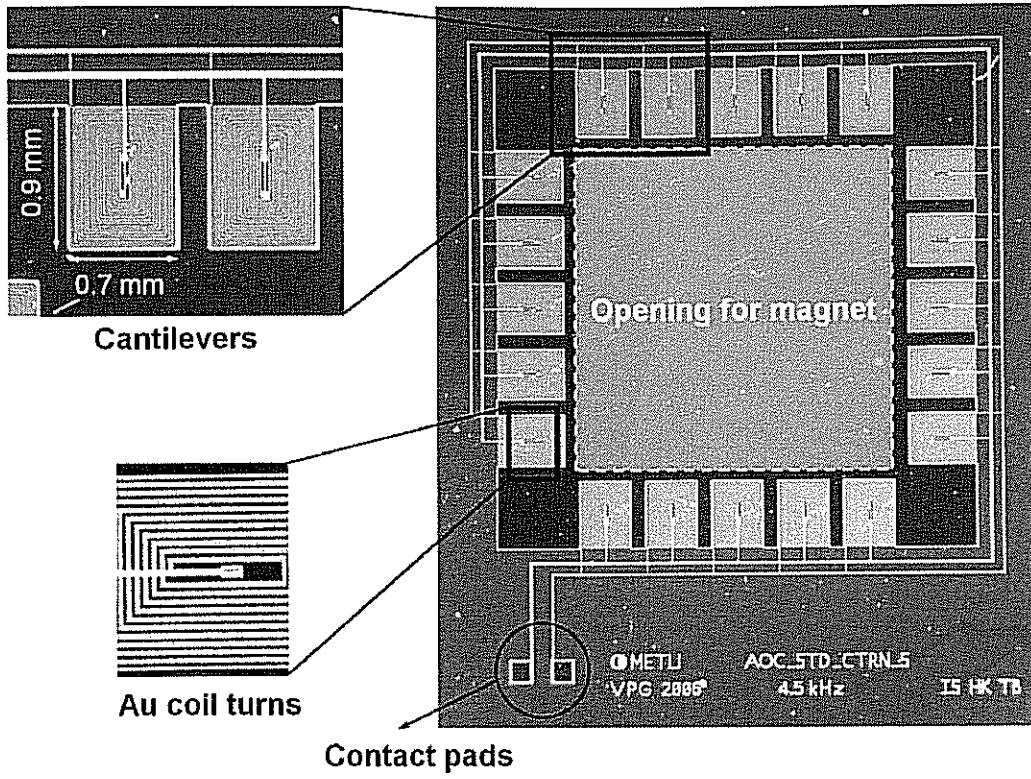
Şekil 29. Geniş frekans bandında etkin enerji üreten seri kol tasarımının serimi



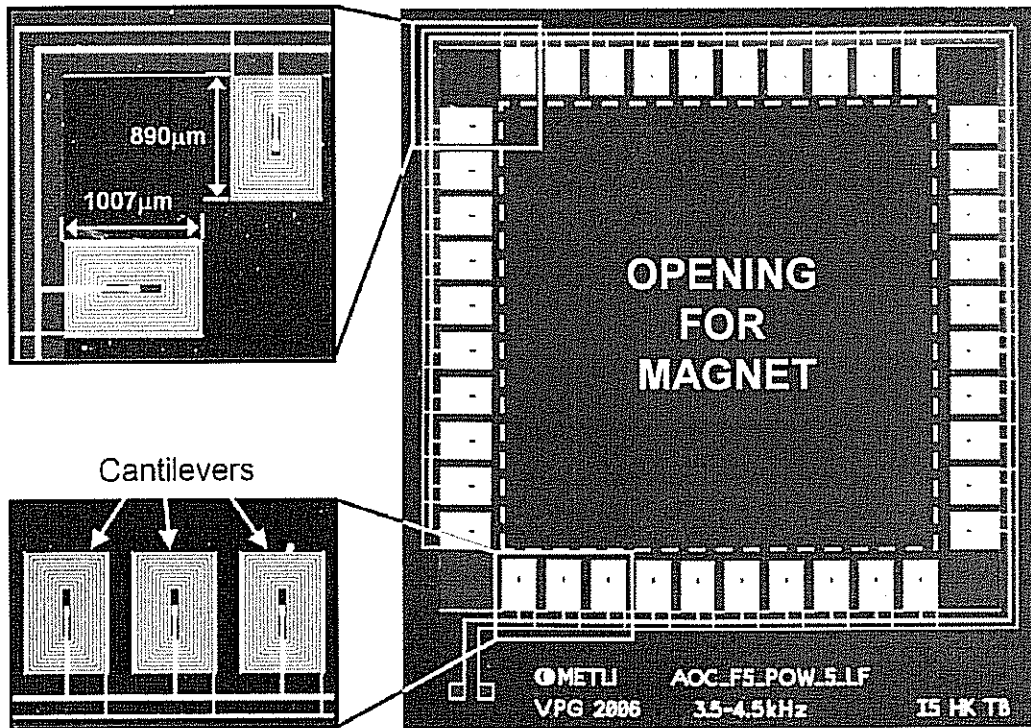
Şekil 30. Büyük kütle-sarım yapısının serimi



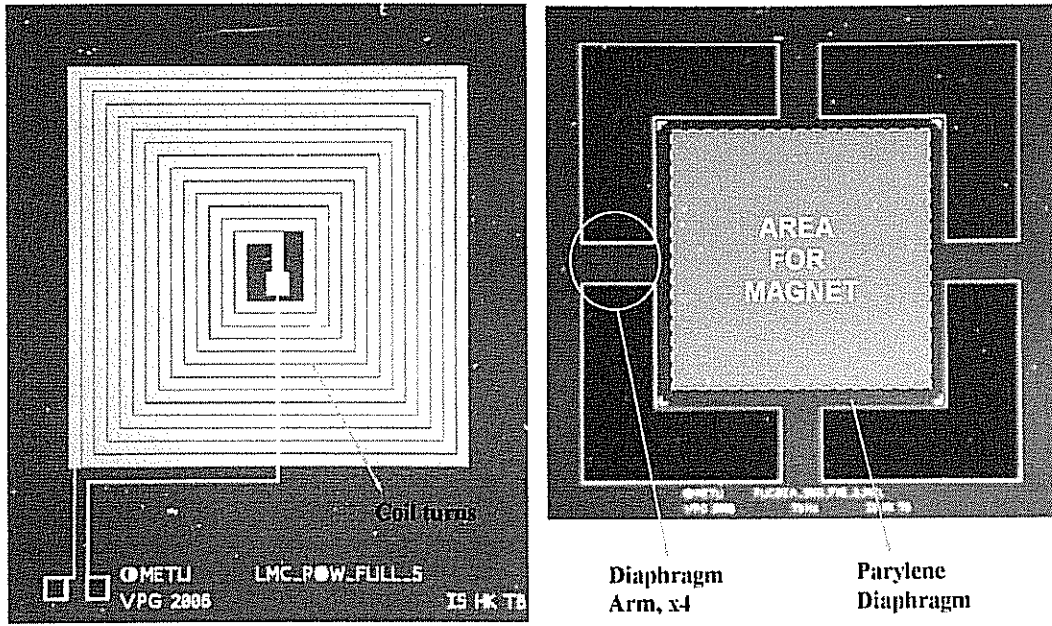
Şekil 31. Frekans çevirim tekniğine dayalı üretimin serimi



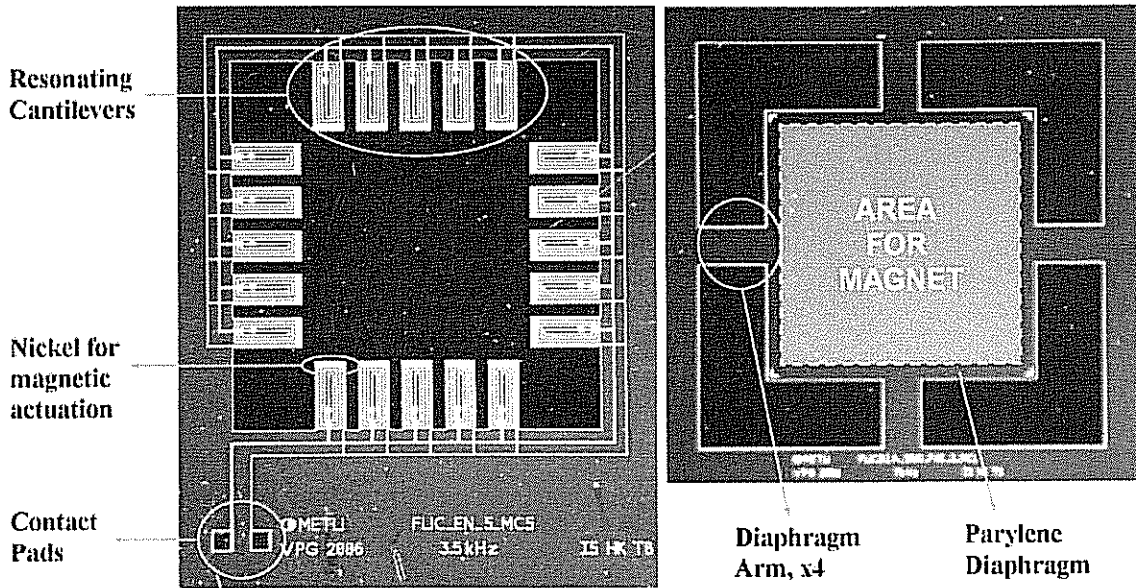
Şekil 32. Tek frekansta etkin enerji üreten seri kol tasarımı



Şekil 33. Geniş bant frekansında etkin enerji üreten seri kol tasarımı



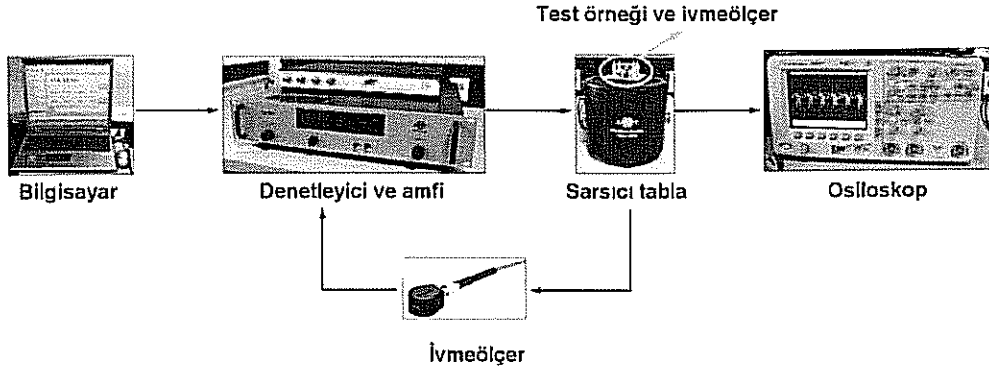
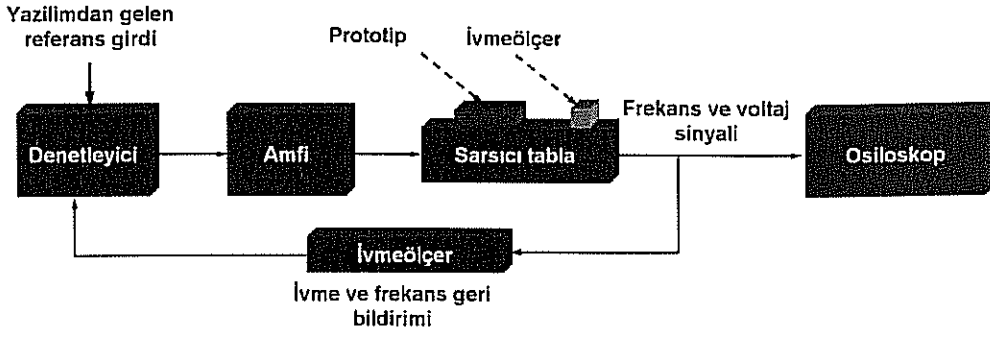
Şekil 34. Büyük kütle sarım yapısı



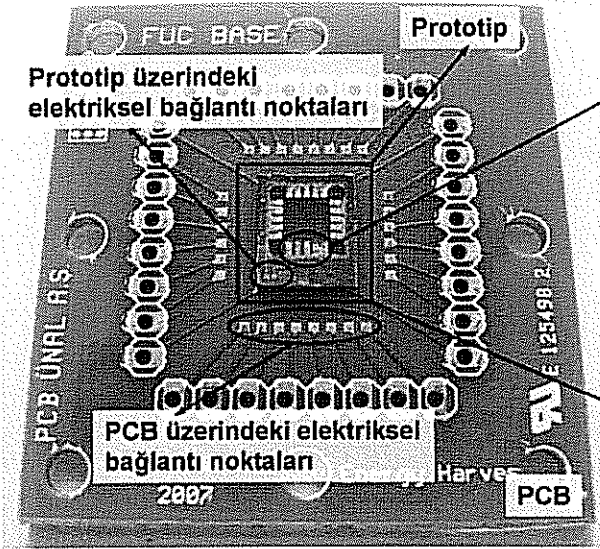
Şekil 35. Frekans çevirim tekniğine dayalı enerji üretici

Üreteçlerin Testleri

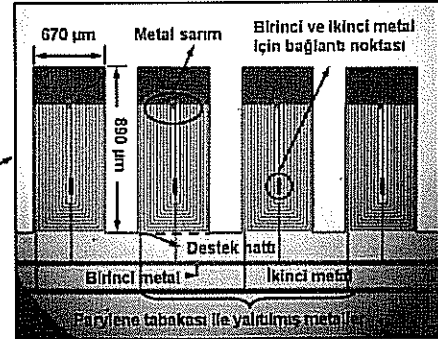
Üretimi tamamlanan modellerin testlerinin yapılması amacıyla bir test düzeneği kurulmuştur. Bu test düzeneği temel olarak bir sarsıcı tabla ve bu tablayı kontrol eden ünitelerden oluşmaktadır. Ayrıca veri toplama amacıyla da ek üniteler, bilgisayar ve yazılım kullanılmıştır. Test amacıyla kullanılan düzeneğin fotoğrafı Şekil 36'da gösterilmiştir. Sistemde bulunan denetleyiciye gerekli deplasman, ivme ve frekans bilgileri girilerek, sistem programlanabilmektedir. Daha sonra elektriksel güçlendirici, denetleyiciden gelen sinyali kullanarak sarsıcı tablayı sürmektedir.



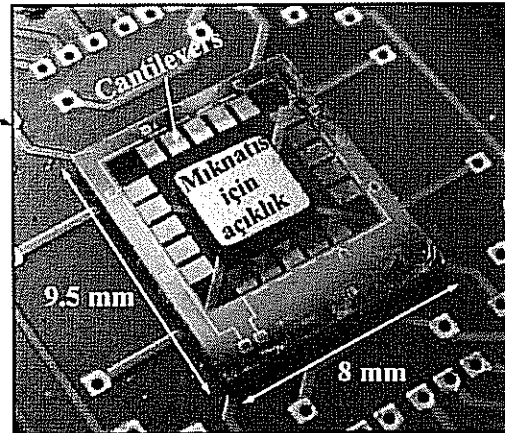
Şekil 36. Test Düzenegi



PCB üzerine yerleştirilmiş olan prototip.



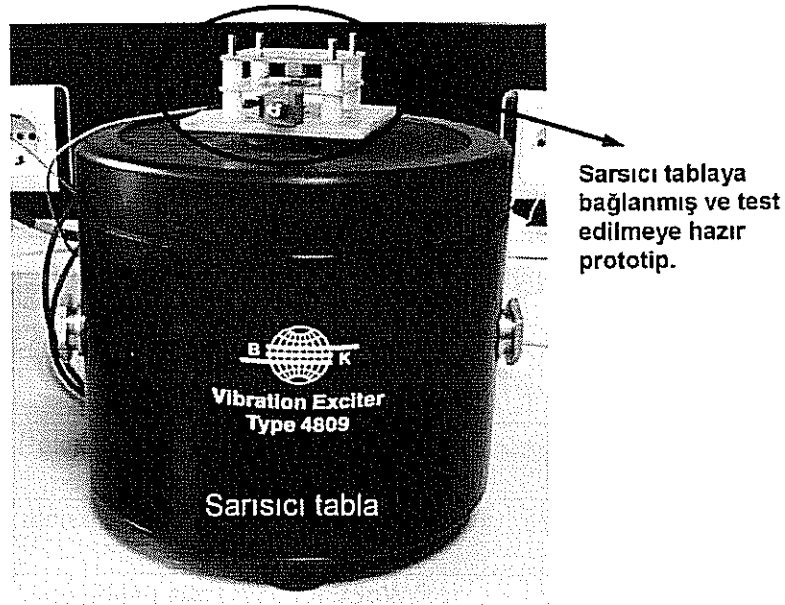
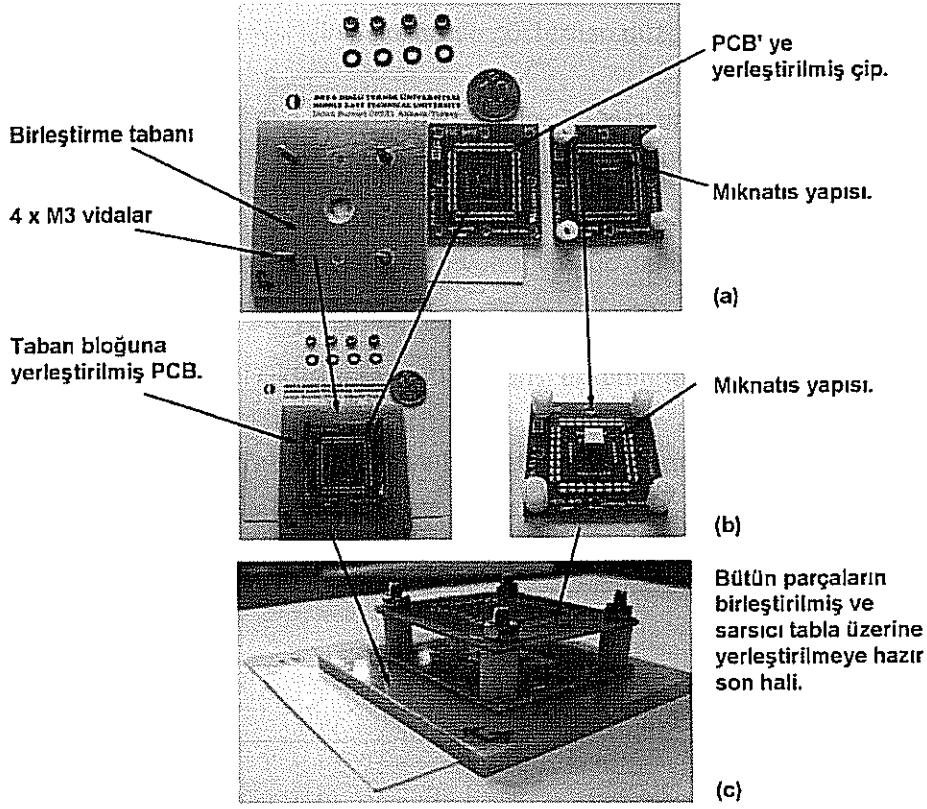
Rezonans kolların yakından görünümü.



Prototipin yakından görünümü.

Şekil 37. Seri kol yapısının testler için hazırlanmış prototipi

Ayrıca bir ivmeölçer kullanılarak deplasman ve sarsıcı tabla üzerinde ölçülen ivme ve frekans bilgisi denetleyiciye geri beslenmektedir. Bu sayede sarsıcı sistem istenilen değerlerde sürülebilmektedir. Mikro jeneratörlerden alınan voltaj ve frekans çıktısı ise bir GPIB ara bağlantısı kullanılarak bilgisayarda toplanmaktadır.



Şekil 38. Seri kol yapısının testleri için hazırlanmış düzenek

Tek Frekansta Etkin Enerji Üretebilen Seri Kol Yapılarının Testleri

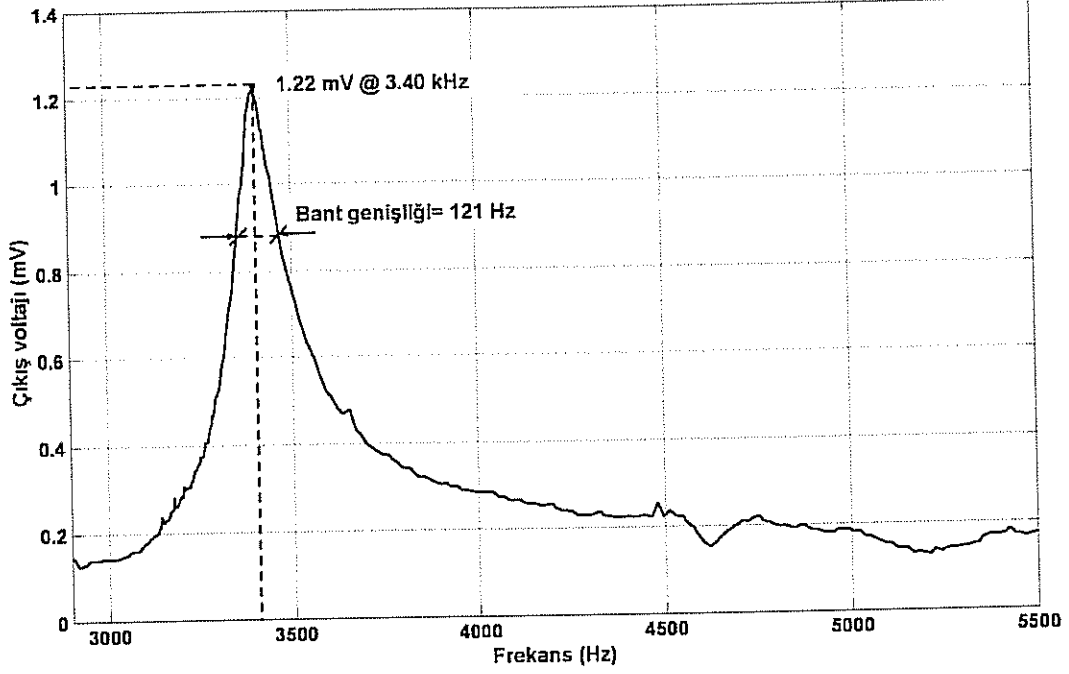
Şekil 37’de üretimi tamamlanan seri kol yapısının PCB üzerinde test için hazırlanmış prototipi verilmiştir. Üretilen jeneratörler özel olarak tasarlanmış PCBler üzerine yapıştırıldıktan sonra elektriksel bağlantıları proje kapsamında satın alınmış olan tel bağlama cihazları ile yapılmıştır. Bu PCBnin sarsıntı tablası üzerine yerleştirilebilmesi ve yerleştirme sırasında oluşabilecek istenmeyen salınım modlarının önlenmesi için Şekil 38’de gösterilen düzenek hazırlanmıştır.

Seri kol yapısının testleri 45g sabit ivme altında, 3-6kHz bant aralığında tamamlanmış olup test sonuçlarının benzetim sonuçları ile kıyası Tablo 8’de sunulmuştur.

Bu yapının testinde tek koldan elde edilen voltaj ve güç değerleri benzetim sonuçlarına yakın olup, aradaki farklılık manyetik akı yoğunluğunun tahminindeki hata payından kaynaklanmaktadır. Şekil 39 seri bağlı 4 kolun voltaj çıktısını sarsıntı frekansı ekseninde göstermektedir.

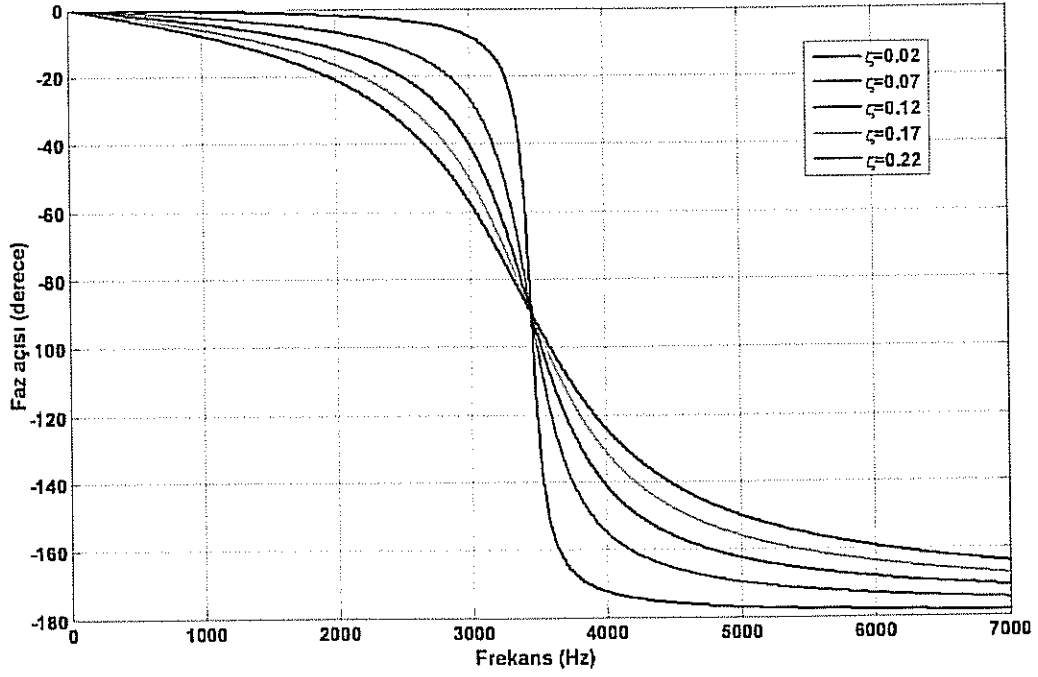
Tablo 8. Test ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

	Benzetim	Test
Ortam	Hava	Hava
Doğal frekans	3.4 kHz	3.45 kHz
Giriş deplasmanı	1 μm	0.97 μm
Mıknatis tipi	NdFeB (1.18 T)	NdFeB (1.18 T)
Mıknatis boyutları	6 x 6 x 6 mm ³	6 x 6 x 6 mm ³
Üreteç boyutları	9.5 x 8 x 6 mm ³	9.5 x 8 x 6 mm ³
Kol boyutları	890 x 670 x 12 μm^3	890 x 670 x 12 μm^3
Bant genişliği	140 Hz	140 Hz
Kol sayısı	20	20
Kol direnci (tek kol)	680 Ohm	750 Ohm
Tek koldan elde edilen çıkış voltajı	0.72 mV/kol	0.67 mV/kol
Tek koldan elde edilen güç	75pW/kol	56pW/kol

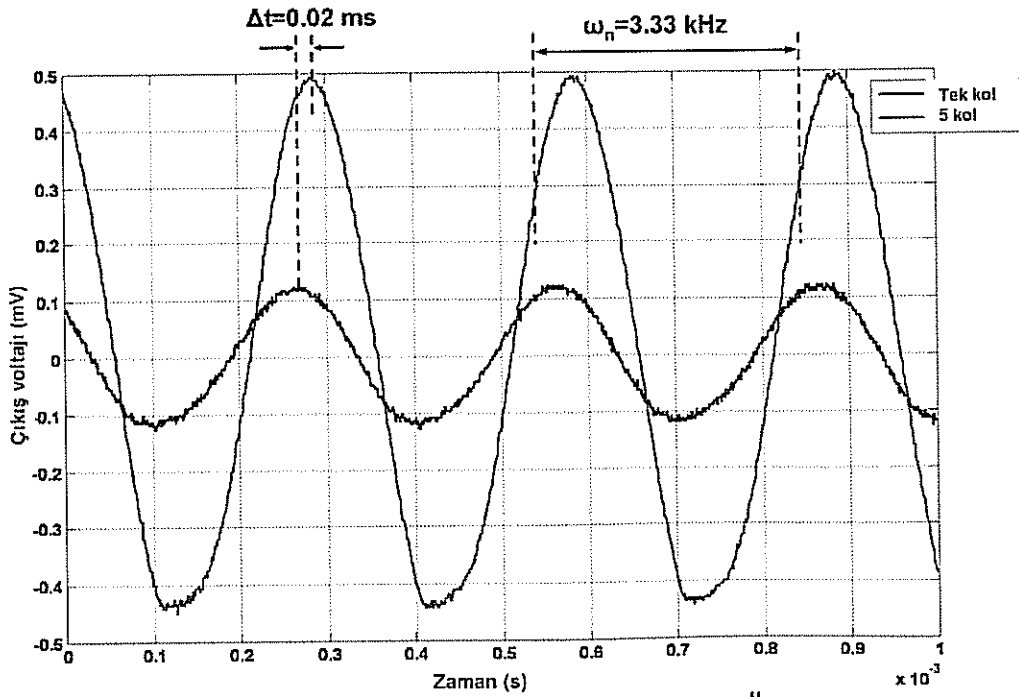


Şekil 39. Seri bağlı dört koldan elde edilen voltaj çıktısı

Bu durumda elde edilen çıkış voltajı beklenenin aksine tek koldan elde edilenin dört katı olmayıp sadece 1.22 mV olarak ölçülmüştür. Bu durumun esas nedeni, üretilen kolların doğal frekanslarında üretim sırasında meydana gelen farklılıkların faz farkı yaratmasıdır. Şekil 40'da üretilen kolların faz kaymasının doğal frekansa bağlı değişimi verilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi doğal frekans çevresinde faz farkı kayması çok fazla olabilmektedir. Başka bir deyişle, doğal frekanstaki 100 Hz'lik bir kayma 75 derecelik faz farkına neden olabilmekte, bu fark da iki sinüzoidal voltajın birbirini sönmemesiyle sonuçlanabilmektedir.



Şekil 40. Seri kollardaki faz açısı değişiminin frekansa bağlı değişimi.



$$\Delta\varphi = \omega_n \Delta t \rightarrow \left. \begin{array}{l} \omega_n = 3.33 \text{ kHz} \\ \Delta t = 0.02 \text{ ms} \end{array} \right\} \Delta\varphi = 24 \text{ deg}$$

Verilen şekilde,

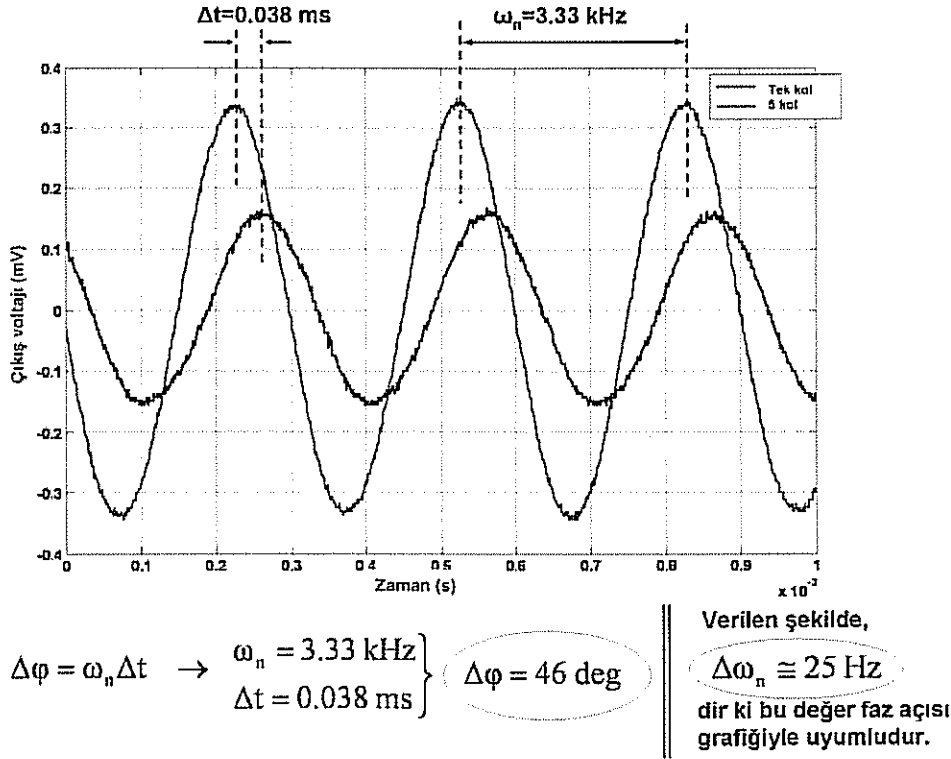
$$\Delta\omega_n \approx 17 \text{ Hz}$$

dir ki bu değer faz açısı grafiğiyle uyumludur.

Şekil 41. Tek bir koldan ve seri bağlı beş koldan alınan voltaj çıktısı.

Bu noktada, gerçek uygulamada ve test sonuçlarında olabilecek azami frekans farklılığını gözlemek önemlidir. Şekil 41'de tek bir koldan ve seri bağlı beş koldan alınan voltaj çıktısı verilmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere iki çıktı arasında 20 μ s gecikme vardır. Bu gecikme 24°'lik faz açısı farkına ve 17Hz'lik doğal frekans kaymasına karşılık gelmektedir.

Şekil 42'de başka bir test örneğinden alınan benzer sonuçlar sunulmaktadır. Buradaki faz farkı 46° olup, frekans farkı 25Hz'dir.

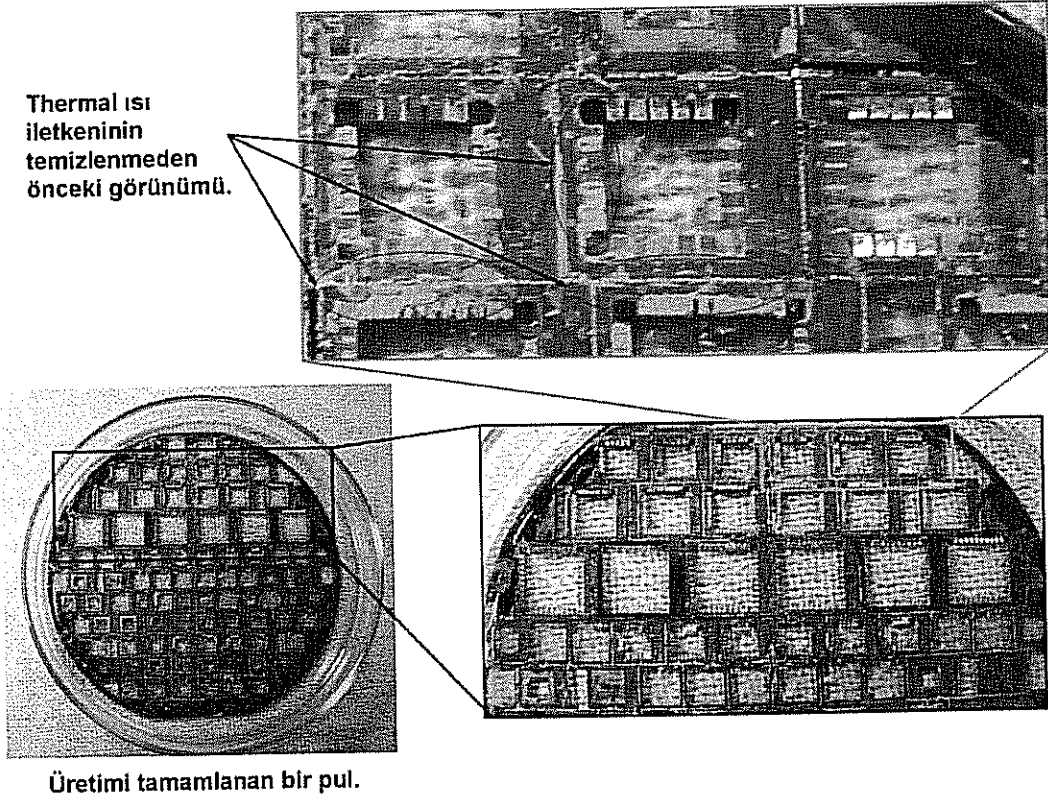


Şekil 42. Tek bir koldan ve seri bağlı beş koldan alınan voltaj çıktısı.

Seri kolların doğal frekansındaki kayma, mikro jeneratörlerin üretimi sırasında, DRIE aşamasında kullanılan ısı yağ (thermal grease) malzemesinin, üretim sonrasında yeterince temizlenememesinden kaynaklanmaktadır. Bu malzeme üretim aşamasında zorunlu olarak kullanılmakta olup, DRIE sırasında parylene malzemenin fazla ısınarak yanmasını önlemektedir. Ancak üretim sonrasında temizliği zahmetli olmakta, tüm çabalara rağmen kolların üzerinde kalıntı bırakmaktadır. Şekil 43'te üretim sonrası elde edilen yapıların temizleme öncesi ısı yağ kalıntılı halleri gösterilmektedir. Bu kalıntılar kolların kütlelerini az da olsa değiştirmekte ve doğal frekanslarını etkilemektedir.

Sonuç olarak, testler sırasında alınan sonuçlar üreteçlerin çalışma prensibini doğrulamaktadır. Isı yağ kalıntılarında oluşan performans düşüşü ürüne dönüşme sürecinde ele alınarak iyileştirilebilir.

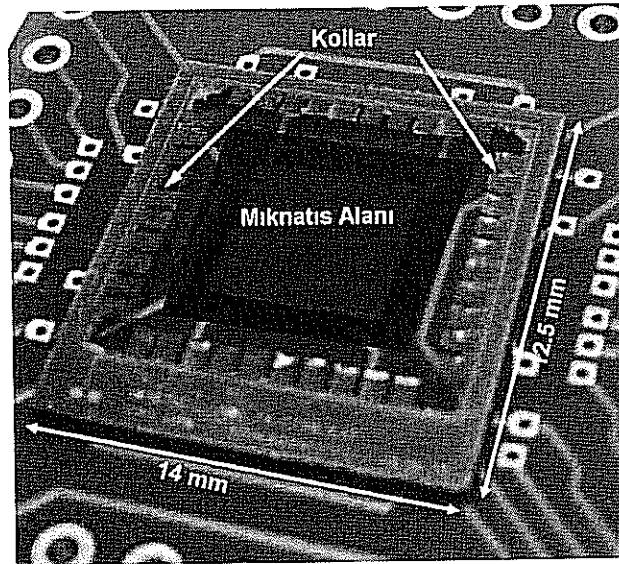
Bu noktada ısıl yağ olarak farklı malzemelerin denenmesi, temizleme için yeni kimyasalların araştırılması soruna çözüm olabilir.



Şekil 43. Üretim sonrası temizleme öncesi ısıl yağ kalıntılı yapılar

Tek Frekansta Etkin Enerji Üretebilen Seri Kol Yapılarının Testleri

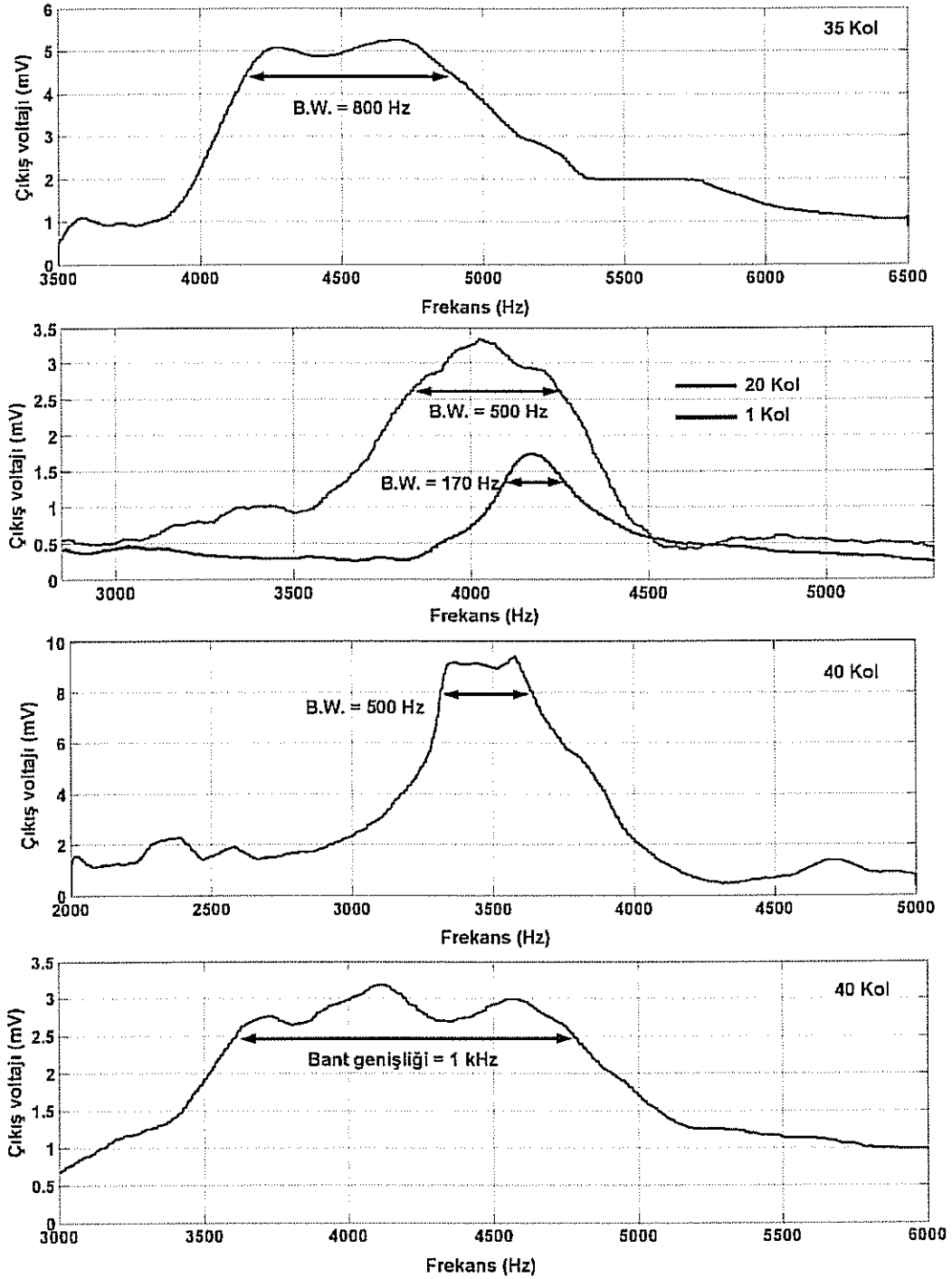
Şekil 44'te üretimi tamamlanan geniş bantta çalışan seri kol yapısının PCB üzerinde test için hazırlanmış prototipi verilmiştir.



Şekil 44. Geniş bantta çalışan seri kol yapısının testler için hazırlanmış prototipi

Geniş bantta çalışan seri kol yapısının testleri 45g sabit ivme altında, 2,5-6kHz bant aralığında tamamlanmış olup test sonuçlarının benzetim sonuçları ile kıyası Tablo 9'da sunulmuştur.

Şekil 45'te farklı test örnekleri için tek koldan ve 20/40 koldan üretilen voltaj çıktıları gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere üretilen örnekler 500-1000 Hz arası bir salınım frekansı aralığında voltaj üretmektedir.

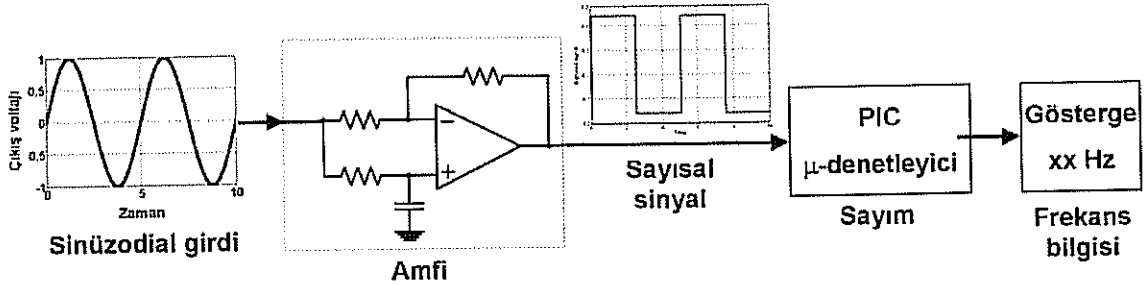


Şekil 45. Tek bir koldan ve seri 20 koldan alınan voltaj çıktısı.

Tablo 9. Test ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

	Benzetim	Test
Kolların doğal frekansı	3.5-4.5 kHz	3.5-4.5 kHz
Kol sayısı	40	20, 35 and 40
Mıknatıs tipi	NdFeB (1.18 T)	NdFeB (1.18 T)
Mıknatıs boyutları	8 x 8 x 8 mm ³	8 x 8 x 8 mm ³
Kol direnci (tek kol)	110 Ω	200 Ω
Bant genişliği	1 kHz	0.5 - 1 kHz
Üretilen güç	2.7nW	0.2 – 1.7nW
Üretilen azami voltaj (40 kol)	9 mV	3 to 9 mV

Geniş bantta çalışan seri kol yapısı aynı zamanda kendi enerjisi ile çalışan frekans sensörü olarak kullanılabilir⁷. Şekil 46'da bu amaçla oluşturulan sensör düzeneği sunulmaktadır. Şekil 47 ve 48'de da, sırasıyla, bu düzenekle alınan test sonuçları ve frekans ölçüm hassasiyeti verilmektedir.

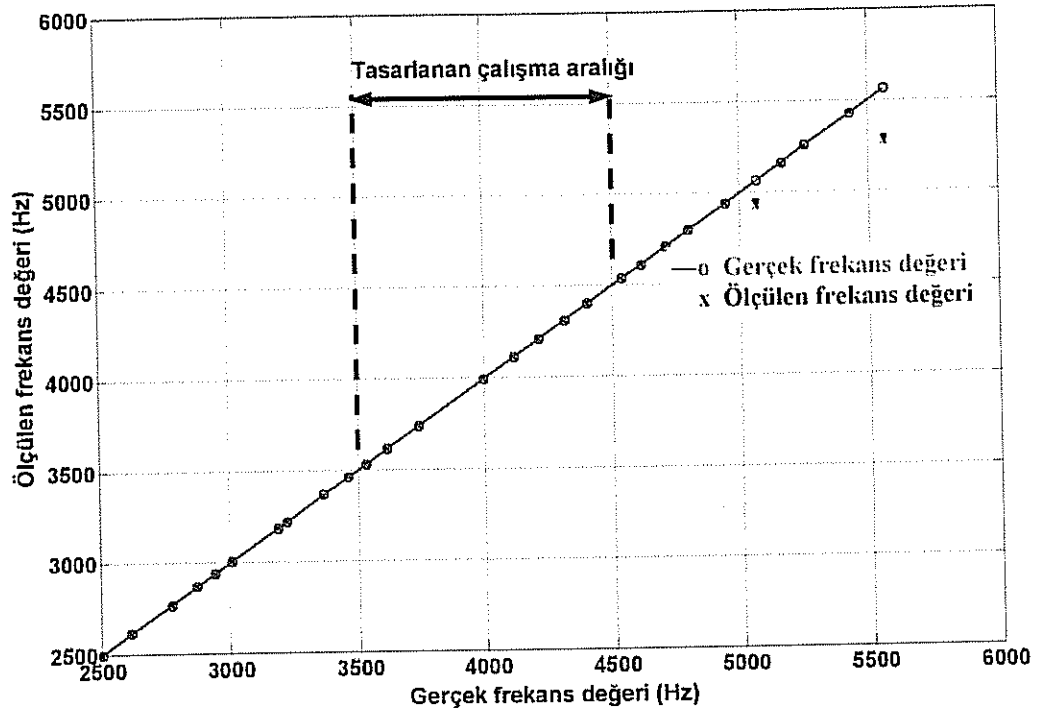


Şekil 46. Üretilen mikro enerji üreticinin frekans sensörü olarak tasarlanmış düzeneği.

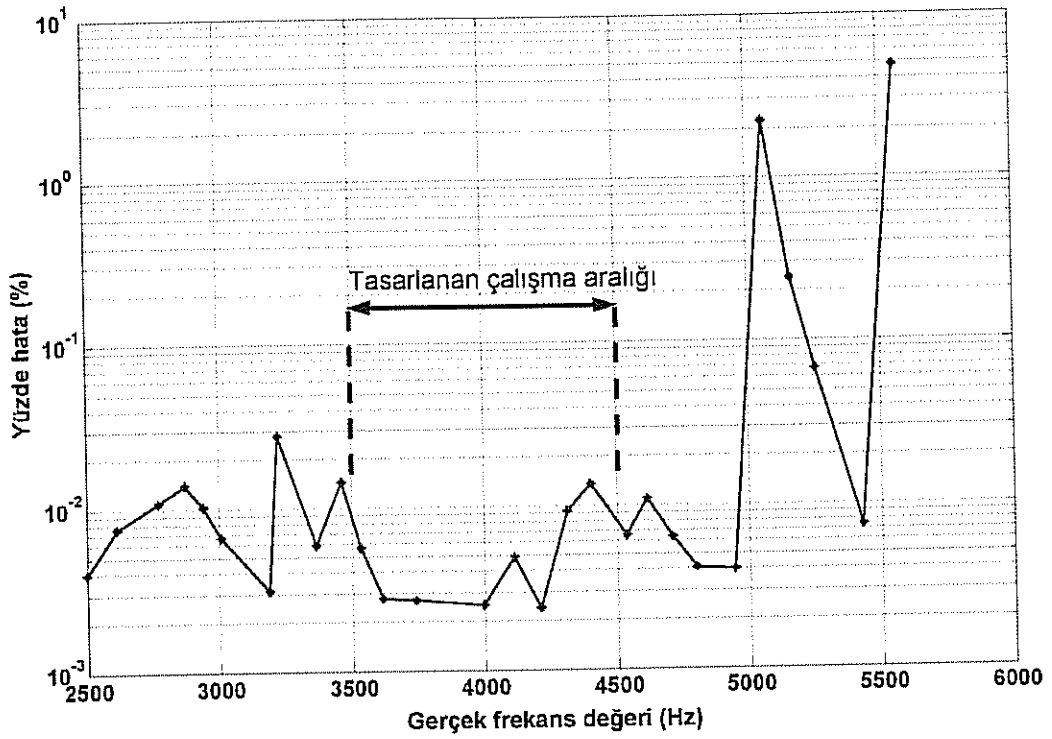
Büyük kütle-sarım Yapılarının Testleri

Şekil 49'da üretimi tamamlanan büyük kütle-sarım yapısının PCB üzerinde test için hazırlanmış prototipi verilmiştir. Bu yapı literatürde sunulmuş benzerlerine benzemekte olup, frekans çevirim tekniğinin geleneksel metodla deneysel karşılaştırmasını yapabilmek amacıyla üretilmiştir. Tablo 10'da bu yapının test sonuçları özetlenmiştir. Şekil 50'de bu yapıdan elde edilen çıktı verilmektedir.

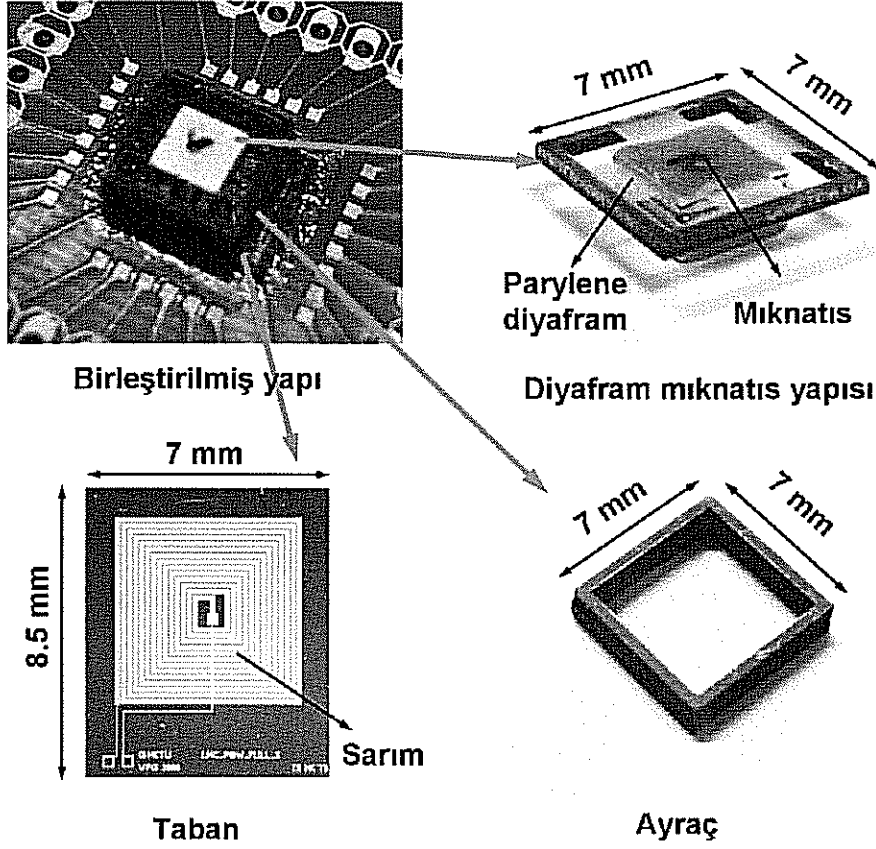
⁷ I. Sari, T. Balkan and H. Kulah, "An Energy Harvesting MEMS Frequency Detector," 6th IEEE Conference on Sensors (IEEE SENSORS 2007), pp. 1460-1463, Atlanta, USA, October 28-31, 2007.



Şekil 47. Frekans sensörünün ölçüm sonuçları.



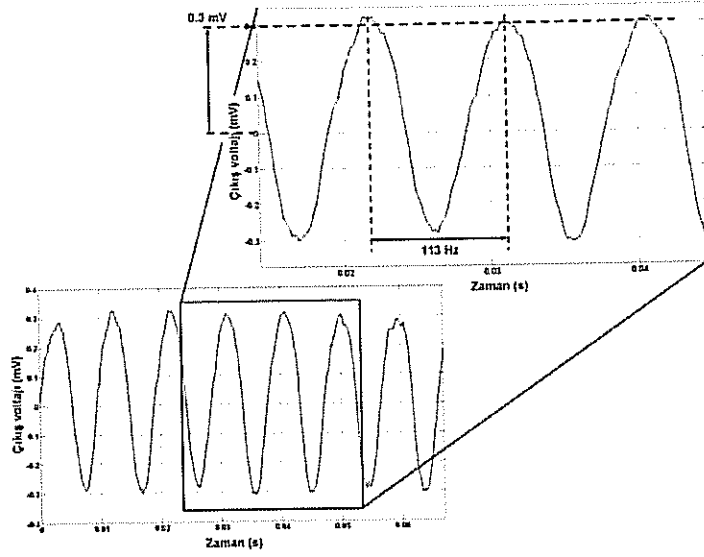
Şekil 48. Frekans sensörünün frekans aralığına göre hatası.



Şekil 49. Büyük kütle-sarım yapısı.

Tablo 10. Test ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

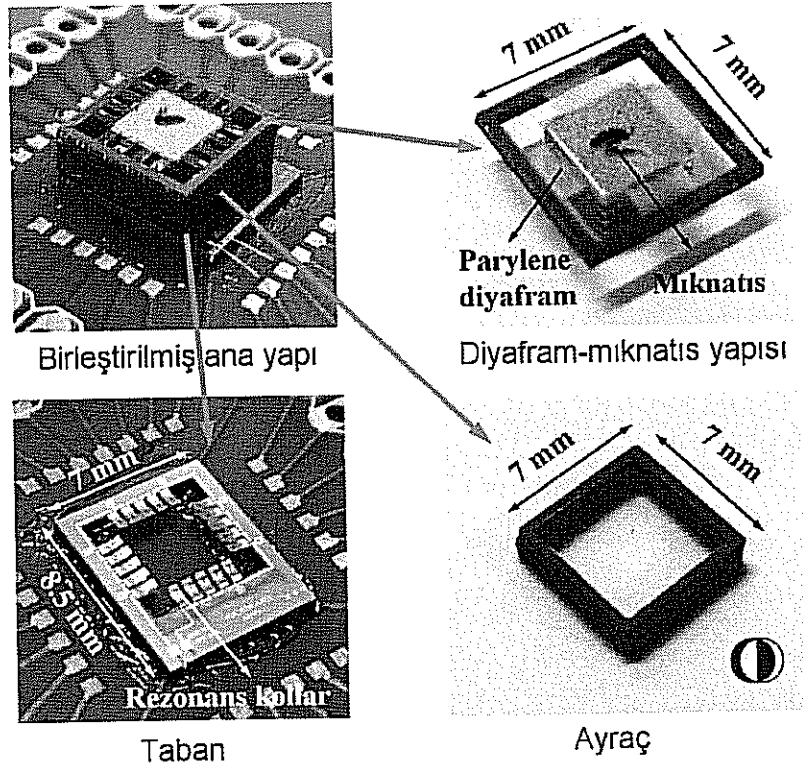
	Benzetim	Test
Sarsıntı frekansı	113 Hz	113 Hz
Mıknatıs tipi	NdFeB (1.18 T)	NdFeB (1.18 T)
Mıknatıs boyutları	3.8 x 3.8 x 1.5 mm ³	3.8 x 3.8 x 1.5 mm ³
Kol direnci (tek kol)	235 Ω	257 Ω
1 saniyede depolanan enerji	42pJ	30pJ
Üretilen güç	85 pW	40pW
Üretilen azami voltaj	0.4 mV	0.3 mV



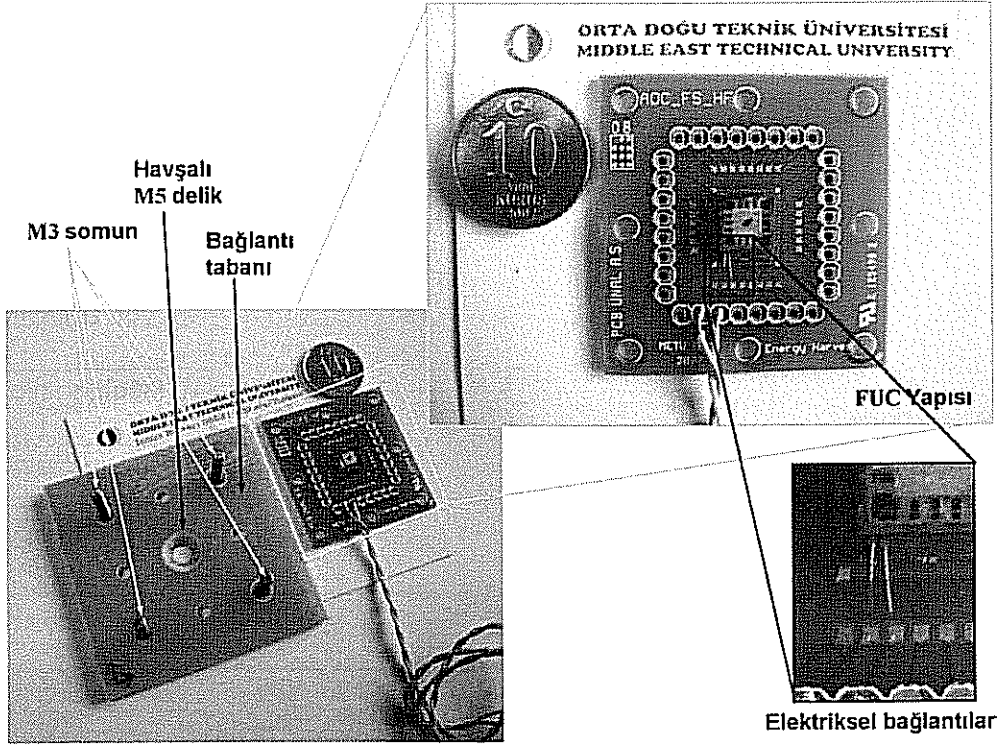
Şekil 50. Büyük kütle-sarım yapısından elde edilen çıktı voltajı.

Frekans Çevirim Tekniğine Dayalı Enerji Üreteçlerinin Testi

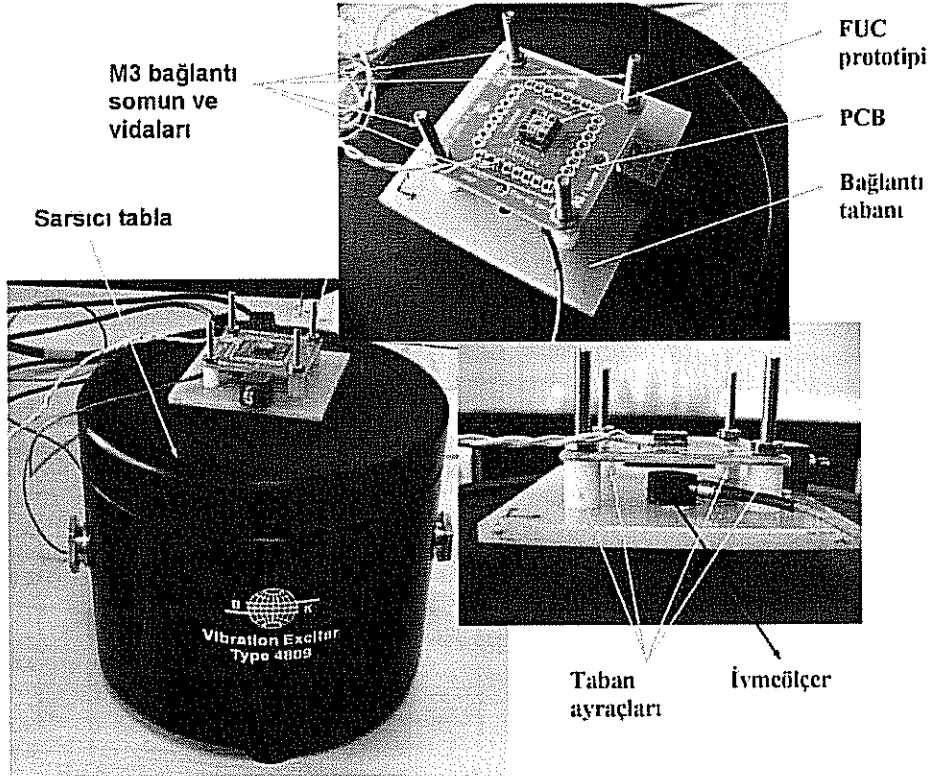
Şekil 51'de üretimi tamamlanan frekans çevirim tekniği ile çalışan üreteç yapısının PCB üzerinde test için hazırlanmış prototipi verilmiştir. Şekil 52 ve 53'te bu yapı için hazırlanan test düzeneği görülmektedir. Tablo 11'de bu yapının test sonuçları özetlenmiştir. Şekil 54 - 56'da bu üreteçten alınan voltaj çıktısı ve benzetim sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 51. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üretici yapısı.



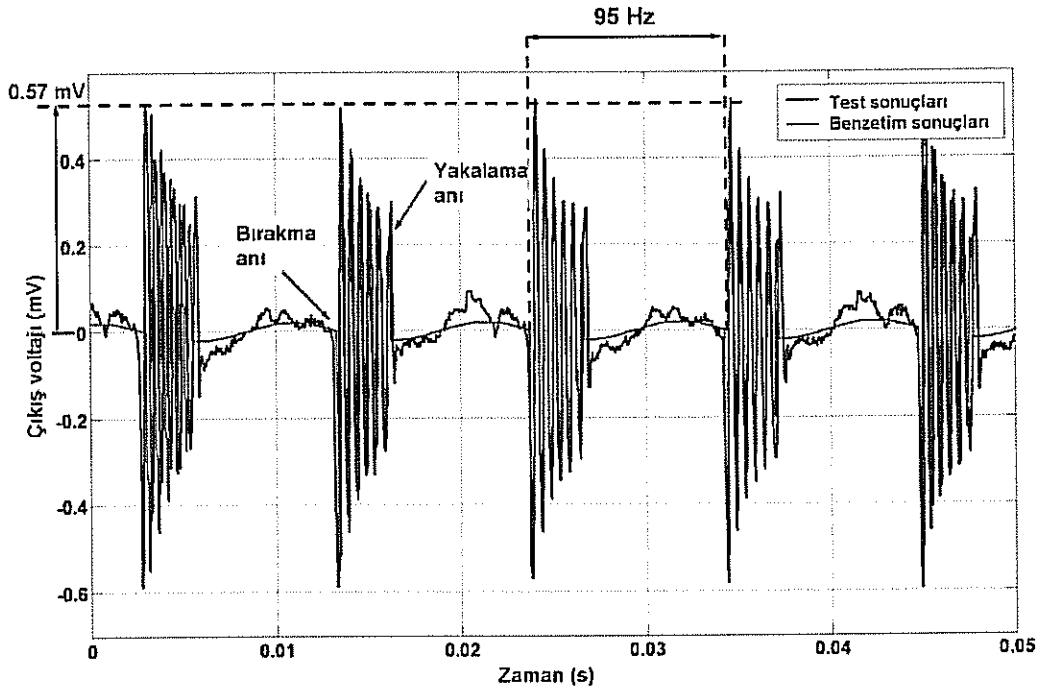
Şekil 52. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üretici için test düzeneği.



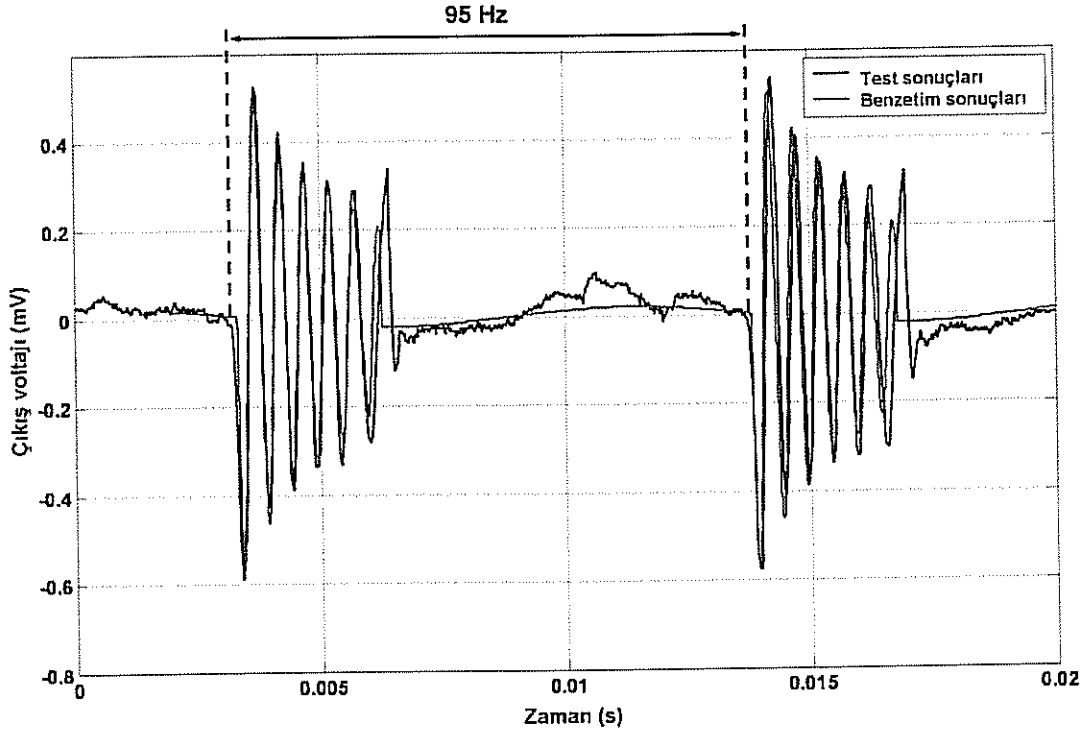
Şekil 53. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üretici için test düzeneği.

Tablo 11. Test ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

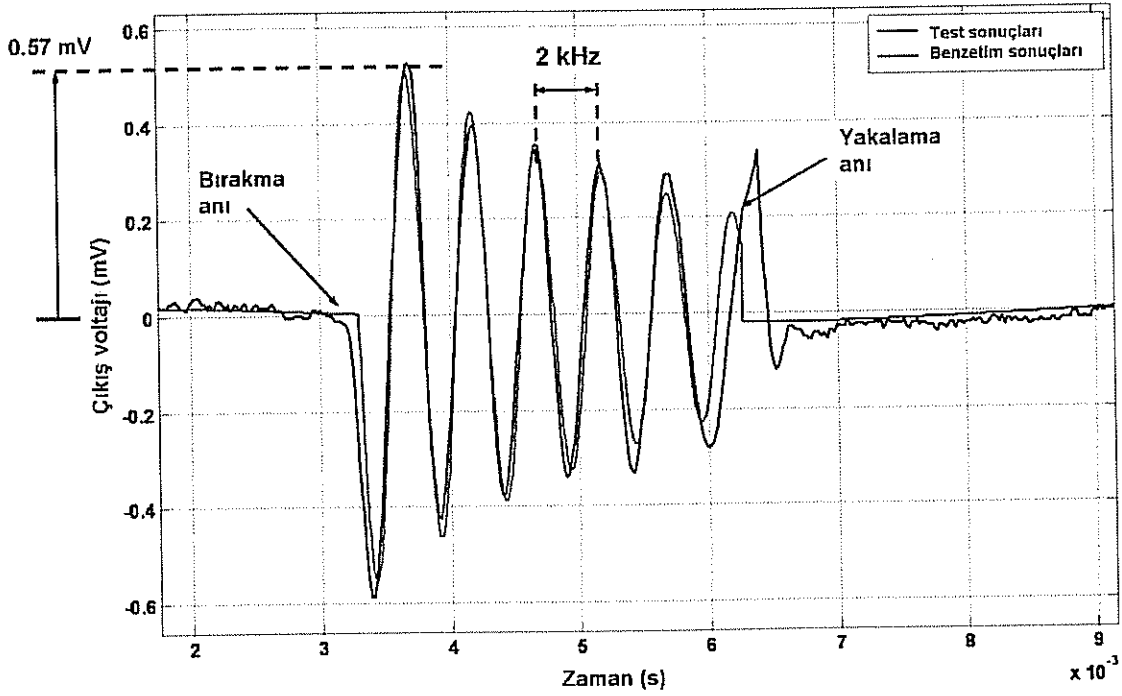
	Benzetim	Test
Sarsıntı frekansı	50-200 Hz	50-200 Hz
Mıknatıs tipi	NdFeB (1.18 T)	NdFeB (1.18 T)
Mıknatıs boyutları	3.8 x 3.8 x 1.5 mm ³	3.8 x 3.8 x 1.5 mm ³
Kolların doğal frekansı	2 kHz	2 kHz
Diyafram doğal frekansı	113 Hz	113 Hz
Kolların bırakılma uzaklığı	200 µm	200 µm
Üretecin çalışma frekansı	50-200 Hz	50-200 Hz
Sarım direnci	160 Ω	150 Ω
1 saniyede depolanan enerji (tek kol)	30.5 pJ	20 pJ
Üretilen güç (tek kol)	0.33 nW	0.25nW
Üretilen azami voltaj (tek kol)	0.67 mV	0.57 mV



Şekil 54. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üreticinde elde edilen voltaj çıktısının benzetim sonuçları ile birlikte gösterimi.



Şekil 55. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üreticinde elde edilen voltaj çıktısının benzetim sonuçları ile birlikte gösterimi.



Şekil 56. Frekans çevirim tekniği ile çalışan enerji üreticinde elde edilen voltaj çıktısının benzetim sonuçları ile birlikte gösterimi.

Tablo 12’de frekans çevirim tekniği ile alınan sonuçlar geleneksel yöntemle göre tasarlanmış büyük-kütle sarım yapısından elde edilenlerle karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır. Tablodan da görüldüğü üzere, frekans çevirim tekniği, çalışma bandının daha geniş olmasının yanı sıra, tek bir koldan elde edilen enerji ve güç miktarlarında bile halen kullanılan teknikle kıyaslanabilir performans göstermektedir. Geliştirilen üreticinin performans üstünlüğünün daha iyi anlaşılabilmesi için literatürde sunulan üreticilerle kıyaslaması Tablo 13’de verilmiştir. Daha önce de açıklandığı üzere frekans çevirim tekniği, üst diyaframın doğal frekansı etrafında geniş bir bandda çalışabilmektedir. Şekil 55’te sunulan test sonuçları üreticinin farklı girdi frekanslarında tek kol ve iki kol üzrinden ürettiği voltajın değişimini göstermektedir.

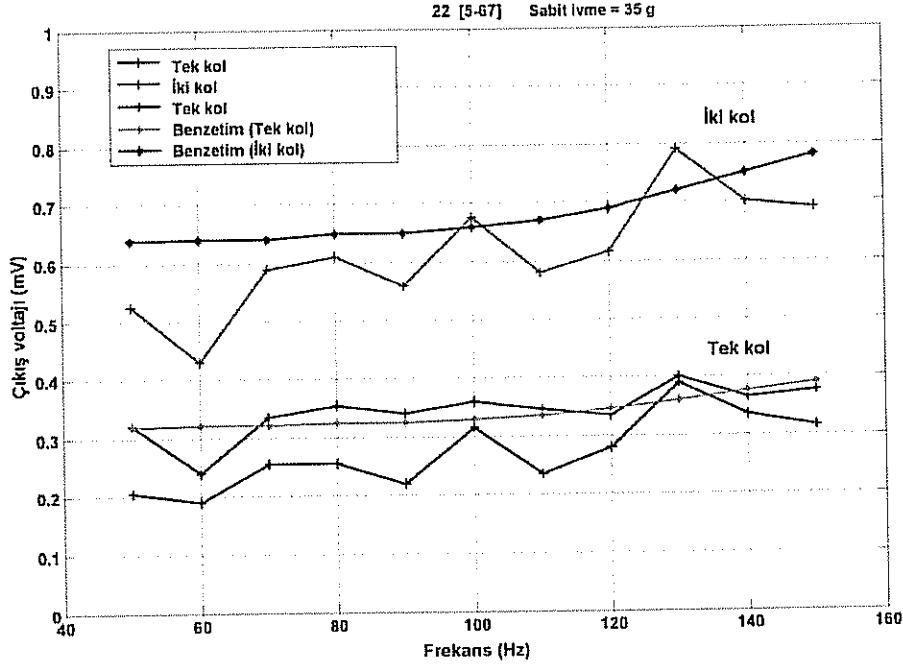
Tablo 12. Büyük-kütle sarım ve frekans çevirim tekniklerinin sonuçlarının karşılaştırması.

	Büyük kütle-sarım	Frekans çevirim (tek kol)
Sarsıntı frekansı	50-200 Hz	50-200 Hz
Diyafram doğal frekansı	113 Hz	113 Hz
Etkin çalışma frekans bandı	113 Hz	50-200 Hz
1 saniyede depolanan enerji	30 pJ	20 pJ
Üretilen azami güç	0.04 nW	0.25 nW
Üretilen azami voltaj	0.3 mV	0.57 mV

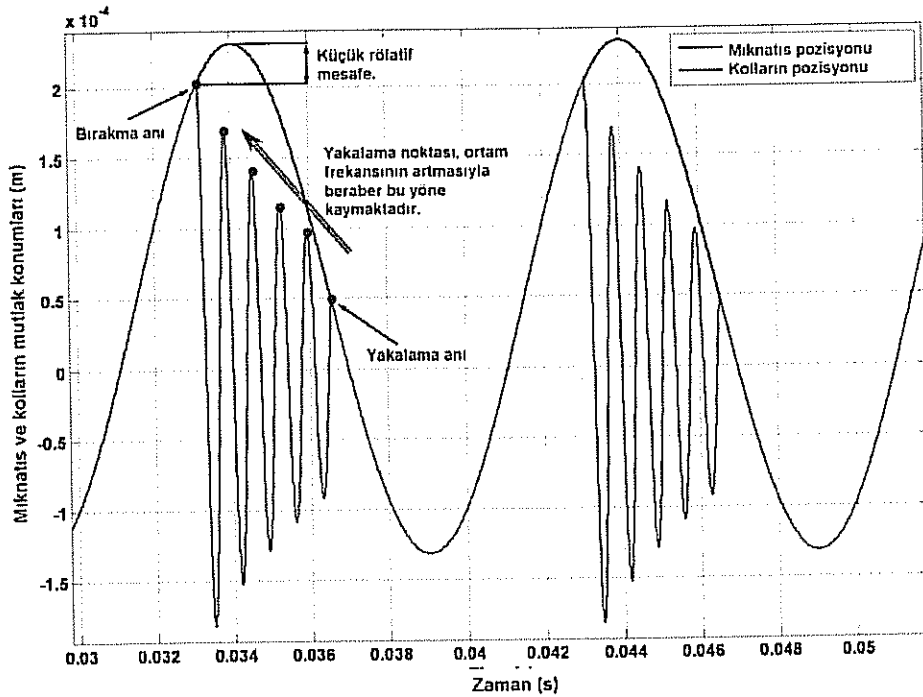
Tablo 13. Geliştirilen üreticinin literatürde sunulmuş olan benzerleri ile karşılaştırması.

	Büyük kütle-sarım (Williams et al.)	Büyük kütle-sarım oranlanmış hali ile (Williams et al.)	Frekans çevirim (tek kol)
Sarsıntı frekansı	4 kHz	113 Hz	113 Hz
Miknatis boyutları	1 x 1 x 0.3 mm ³	1 x 1 x 0.3 mm ³	3.8 x 3.8 x 1.5 mm ³
Üreteç boyutları	6.5 x 6.5 x 0.7 mm ³	6.5 x 6.5 x 0.7 mm ³	8.5 x 7 x 2.5 mm ³
Sarım direnci	31 Ω	31 Ω	150 Ω
Number of coil turns	13	13	6
Üretilen azami güç	0.3 μW	0.23 nW	0.25 nW
Üretilen azami voltaj	8.7 mV	0.24 mV	0.57 mV

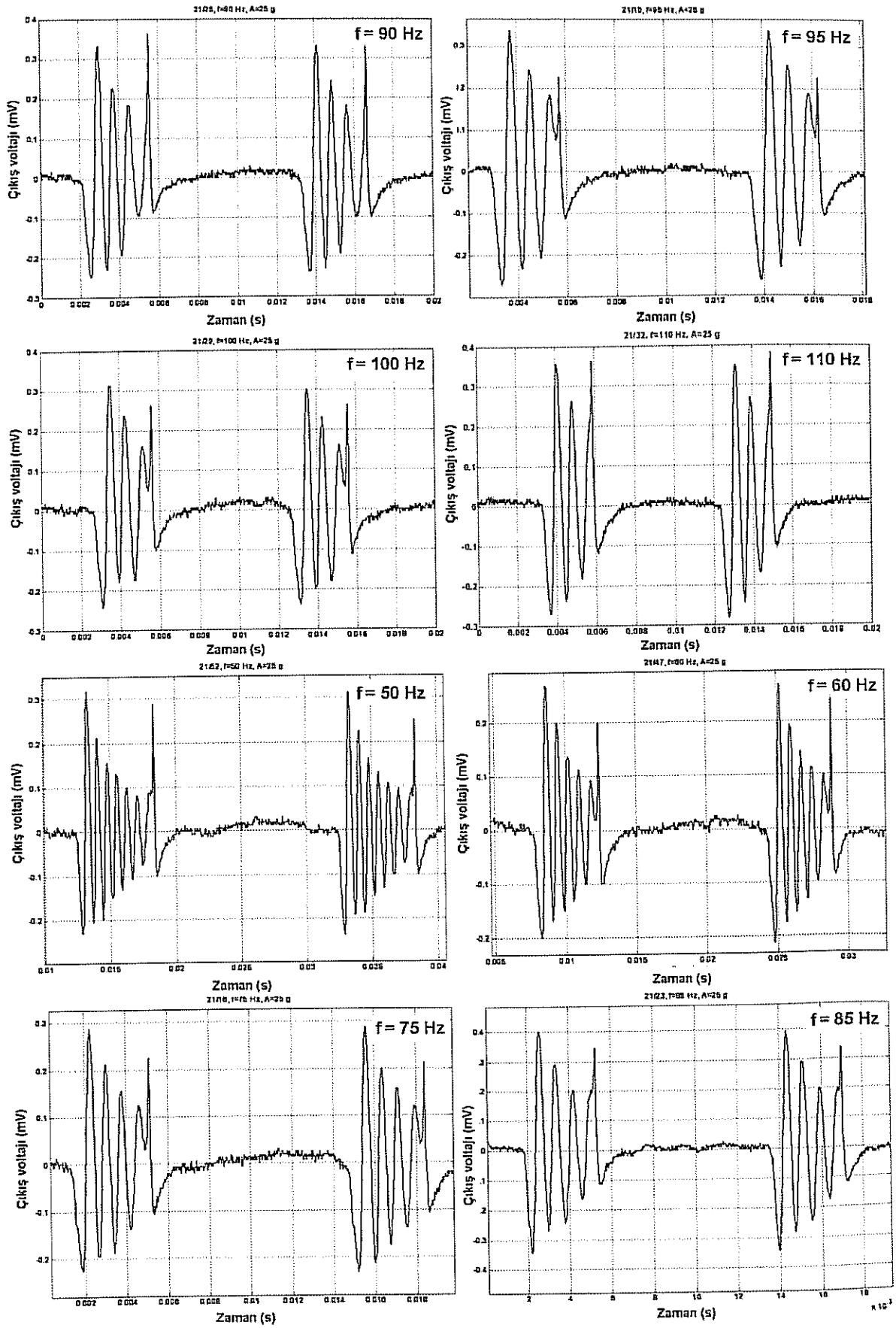
Girdi sarsıntı frekansı değıştikçe, doğal olarak sarımlı kolların yakalanma ve bırakılma noktaları da değışmekte ve dolayısıyla elde edilen voltaj çıktısındaki maksimum noktaların sayısı etkilenmektedir. Şekil 58’de bu durum gösterilmekte, Şekil 59’da ise farklı sarsıntı frekansları için elde edilen test sonuçları verilmektedir.



Şekil 57. Frekans virim tekniği ile çalışan enerji retedinin farklı girdi salınımlı frekanslarında elde edilen voltaj çıktısının benzetim sonuçları ile birlikte gösterimi.

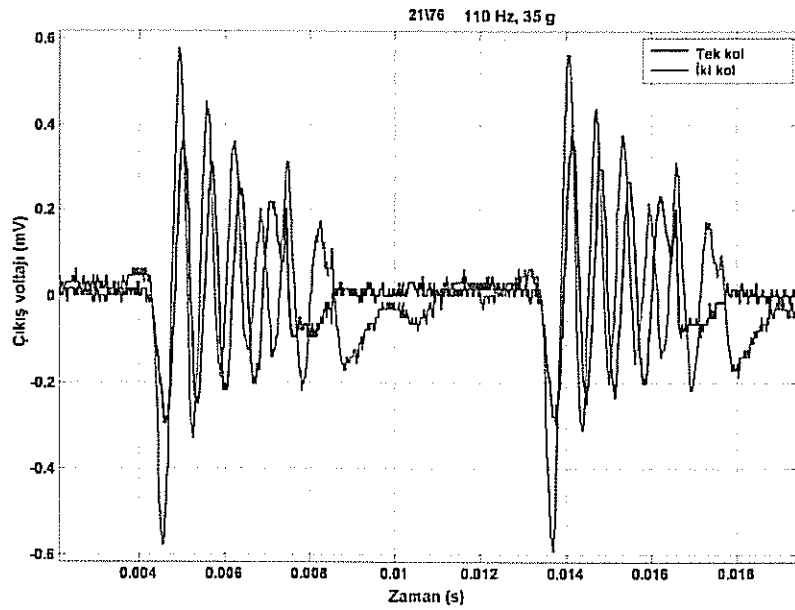


Şekil 58. Sarsıntı frekansının kol bırakma ve yakalama noktası üzerine etkisi.

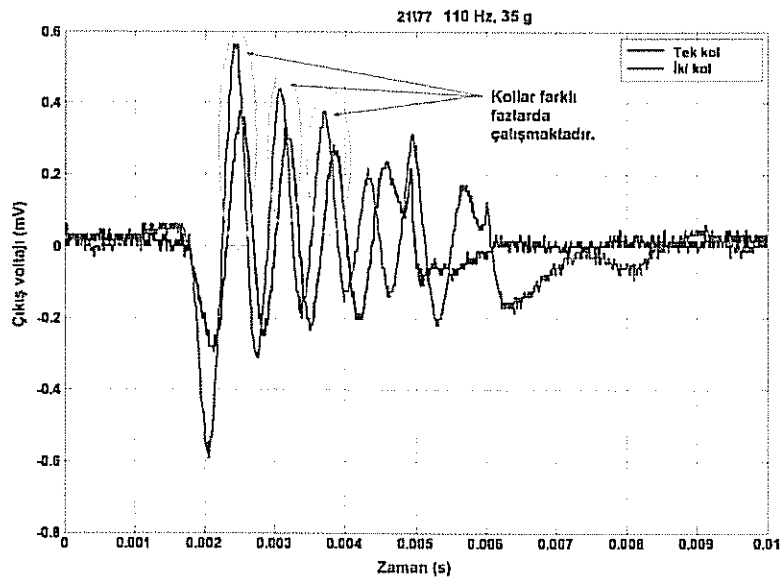


Şekil 59. Sarsıntı frekansının üretilen voltaj üzerine etkisi.

Bu kısma kadar sunulan test sonuçlarında tek bir koldan elde edilen voltaj çıktısı verilmektedir. Birden fazla seri bağlı kollardan elde edilen voltaj çıktıları incelendiğinde elde edilen voltaj çıktısının benzetim sonuçlarından farklı olduğu gözlenmiştir. Bu durum temel olarak iki sebepten kaynaklanmaktadır. Birinci sebep, seri kol yapısının test sonuçlarında da açıklandığı gibi, kollardan doğal frekansının üretimden kaynaklanan nedenlerle birbirlerinden az da olsa farklı olması, ve bunun elde edilen voltaj çıktılarında faz farkı yaratmasıdır. Bu durum Şekil 60'de gösterilen test sonuçlarında açıklanmaktadır. Şekil 60'dan da görüldüğü üzere seri bağlı iki koldan elde edilen voltaj tek koldan elde edilenin iki katı değildir. Şekil 61'de çıktılar arasındaki faz farkı daha yakından gösterilmektedir.

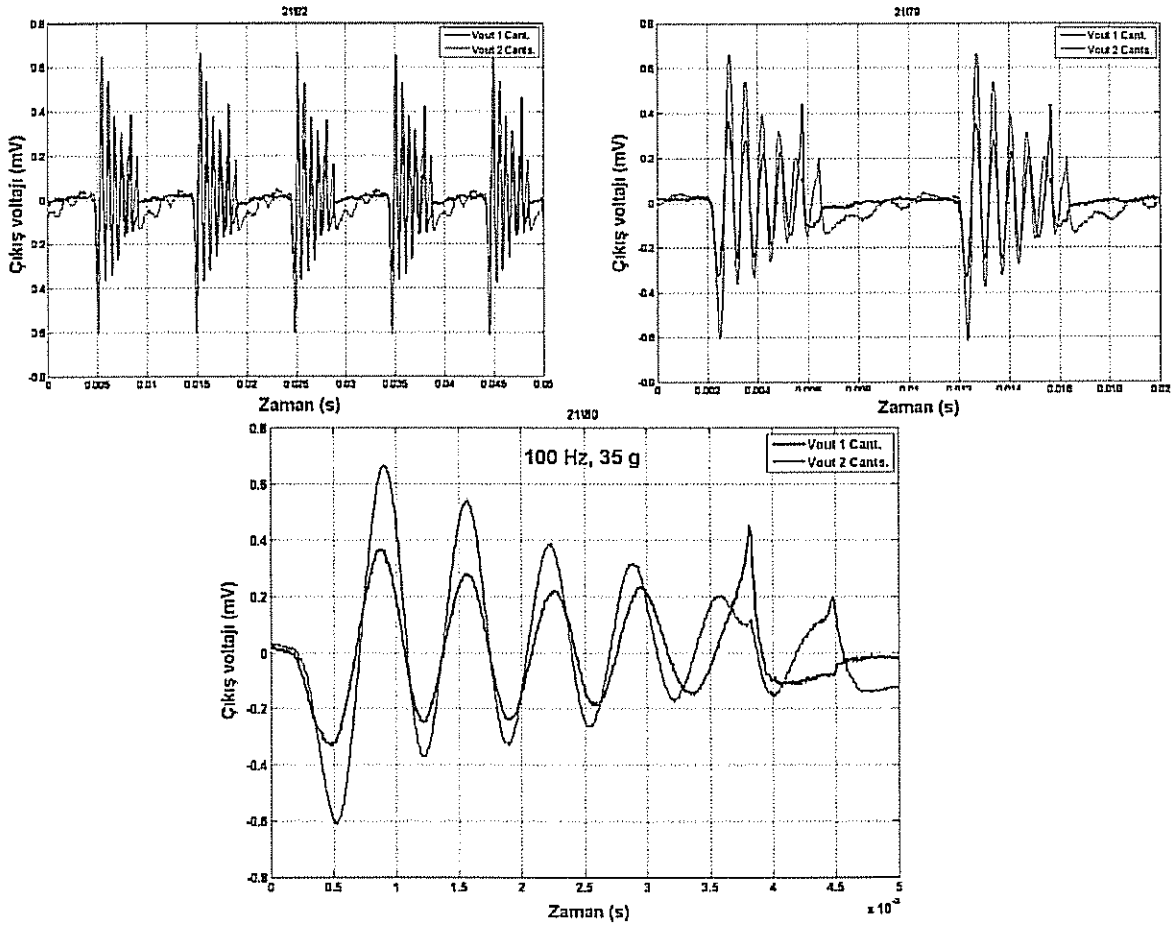


Şekil 60. Frekans çevirim tekniğiyle seri bağlı birden fazla koldan elde edilen gerilim.



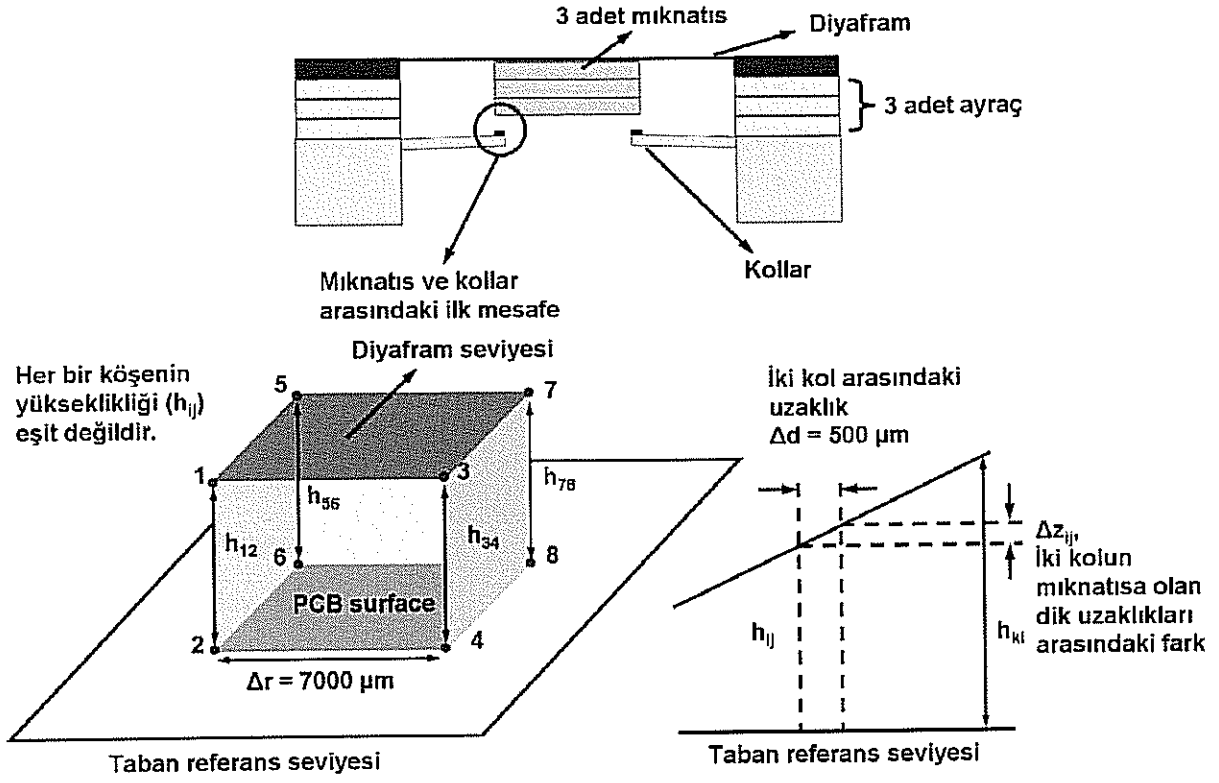
Şekil 61. Frekans çevirim tekniğiyle seri bağlı birden fazla koldan elde edilen gerilim.

Bu yapıda, kollardan elde edilen voltajlardaki faz farkı tamamiyle üretim sırasında tam olarak temizlenmeyen ısıl yağ tabakasından kaynaklanıp, test edilen prototip yapılar arasında temizleme başarısına göre farklılık göstermektedir. Şekil 62’de test sonuçları verilen prototipte faz farkı asgari olarak gözlenmiştir.



Şekil 62. Faz ve doğal frekans farkının az görüldüğü örneklerin test sonuçları.

Seri kolların toplam voltajının her bir koldan elde edilenlerin matematiksel toplamından az olmasının bir başka nedeni de, kolların yakalanma ve bırakılma zamanlarının farklı olmasıdır. Kolların yakalanma ve bırakılma zamanlarının farklılığı da üst diyafram üzerindeki mıknatısla aralarındaki mesafenin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi frekans-çevirim tekniği ile çalışan enerji üreteçleri oluşturulurken 3 farklı çip mikroskop altında yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmektedir. Bu aşamada üç çipin kenarları arasında yükseklik farkı oluşabilmektedir. Bu yükseklik farkı mikrometreler mertebesinde olmakla birlikte, hesaplamalarımıza göre kolların yakalanma ve bırakılma zamanları arasında kaydadeğer ve sonucu etkileyebilecek farklılara neden olabilecek seviyelerdedir. Şekil 63’de birleştirilme aşamasındaki hizalama hatalarının sonuca olan etkisi detaylı olarak incelenmektedir.



Şekil 63. Hizalama hatalarının kol yakalanma ve bırakılma mesafesine etkisi.

SONUÇ VE BULGULAR

Bu araştırma projesi kapsamında MEMS teknolojisi kullanarak mikroşlenmiş sistemler ve entegre devreler için gerekli güç üretimini sağlayacak mikro enerji üreteçleri tasarlanmıştır. Güç üretimi herhangi bir ekstra kaynak kullanılmadan, sadece ortamda var olan sarsıntının elektrik enerjisine çevrimi ile sağlanmıştır. Bu sayede Türkiye’de ilk defa MEMS teknolojisi kullanılarak ortamdaki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren sistemler geliştirilirken, dünya literatüründe de ilk olarak 1-100Hz arası frekansta etkin enerji üretimi sağlayan yapılar üretilmiştir. Elde edilen kazanımlar aşağıda verilen başlıklar halinde sıralanabilir:

- 1. Mikro-üreteç üretim sürecinin geliştirilmesi:** Enerji üretim çiplerinin temelini oluşturan rezonans kol yapıları parylene isimli polimerden üretilmiştir. Bu polimer şeffaf, esnek, kaplaması kolay, CMOS devre üretimi ile uyumlu olması nedeniyle seçilmiştir. Parylene mikrokolların üretim süreci ODTÜ-MET tesislerinde geliştirilerek optimize edilmiştir. Bu üretim süreci grubumuzda yürütülen diğer projeler için de değerli olup yeni araştırma konularına yönelmemize imkan tanımıştır.
- 2. Farklı uygulama alanlarına yönelik enerji üreteçlerinin geliştirilmesi:** Farklı uygulama alanlarına hitap edebilecek özgün yapılardan oluşan enerji üreteçleri üretilerek performansları karşılaştırılmıştır. Bu yapılar test edilerek enerji depolama performansları, ve üretim sürecinde meydana gelen boyut ve kütle sapmalarından kaynaklanan performans hataları incelenmiştir. Bu çalışmada dört farklı tasarım geliştirilmiştir:
 - İlk tasarım parylene malzemesinden yapılmış, metal sarımlar taşıyan ve sabit bir mıknatısa göre hareket edebilen 20 adet rezonans koldan oluşmaktadır. Her bir koldan, 3.45 kHz’lik bir titreşim frekansında, 0.67 mV’luk voltaj ve 56 pW’lık güç üretilbildiği gösterilmiştir. Bu üreteçlerden elde edilen enerji miktarı, yapılarda kullanılan kol sayısı artırılarak, daha iyi litografi aletleri ile kollar üzerindeki sarım sayısı artırılarak önemli ölçüde geliştirilebilir. Bu sistemler, otomotiv endüstrisi (motor sarsıntısı, tekerlek sarsıntısı v.s.) gibi sarsıntı frekansının çok yüksek olduğu ortamlarda kullanılabilir.
 - İkinci tasarımda farklı uzunlukta rezonans kollar kullanılarak bant genişliğinin artırılması hedeflenmiştir. Yapılan testlerle, bant genişliğinin 1000 Hz’e kadar artırılabileceği ve 9 mV’luk sabit voltaj ve 1.7 nW’lık sabit güç elde edilebileceği gösterilmiştir.

- Üçüncü tasarım ise literatürde sıkça kullanılan büyük kütle sarım jeneratörüdür ve önerilen yeni yapılarla kıyaslama yapabilmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu jeneratör üzerinde sabit metal sarımlar ve hareketli bir mıknatıs-diyaffram yapısı bulunmaktadır ve 113 Hz'lik titreşim frekansında, 0.3 mV'luk voltaj ve 40 pW'lık güç elde etmek mümkündür.
- Geliştirilen son tasarım ise 1-100 Hz aralığındaki titreşimleri, 2-3 kHz aralığına taşıyarak enerji çevirim verimliliğini arttırmaktadır. Literatürde ilk kez önerilen bu yapı iki parçadan oluşmaktadır: diyaffram-mıknatıs yapısı ve bunun hemen altında, üzerinde seri olarak bağlanmış sarımlar bulunan 20 adet rezonans kol. Diyaffram çevresel titreşimlerle salınmakta ve ucunda nikel (Ni) bulunan kolları yakalayıp bırakmakta ve frekans çevrimini sağlamaktadır. 113 Hz'lik çevresel titreşim frekansında, her bir koldan 0.57 mV'luk voltaj ve 0.25 nW'lık güç elde edilebildiği gösterilmiştir

3. Düşük frekanslarda etkin enerji çevrimine olanak veren frekans çevirim tekniğinin geliştirilmesi: Proje kapsamında literatürde ilk defa frekans çevirim tekniğine dayalı bir mikroenerji üretici tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu yapı geleneksel tekniğe dayalı üreteçlerle deneysel olarak kıyaslanarak üstünlüğü ispatlanmıştır.

Sonuç olarak, bu proje kapsamında ilk aşamada düşük enerji seviyesinde de olsa, farklı frekans aralıklarında, farklı amaçlar için kullanılacak mikroüreteçler geliştirilmiştir. Bu üreteçlerden elde edilen enerji miktarı, yapılarda kullanılan kol sayısı artırılarak ve/veya daha iyi litografi aletleri ile kollar üzerindeki sarım sayısı artırılarak önemli ölçüde geliştirilebilir. Örnek olarak, şu an 20 µm kalınlıkta tasarlanmış olan, sarımları oluşturan metal hat kalınlıkları 2 µm'ye indirildiğinde, tek bir koldaki sarım sayısı 10 kat artacak, bu da üretilen enerji miktarına doğrudan yansiyacaktır. Aynı şekilde tüm üreteç alanı daha fazla kol bulundurabilecek şekilde optimize edilerek üreteç hacmi artmaksızın, elde edilen enerji miktarı iyileştirilebilir. Bu projede elde edilen sonuçlar daha gelişmiş mikro yapılar için uygulanabilirliği göstermektedir. Ayrıca bu sistemlerin uygulama alanlarının geniş bir kısmını oluşturan mikro duyurga sistemlerinde bilgi bir kaç saatte bir, kısa bir süre içinde transfer edilmekte, bu sayede gün boyu depolanan enerji biriktirilip günde bir kaç kez harcanarak kullanılabilir.

Bu proje kapsamında geliştirilen üreteçlerden elde edilen güç ve voltaj seviyeleri, çalışma frekansları ve sarım sayısı gibi faktörler göz önüne alındığında, matematiksel benzetimlerle ve literatürde sunulan benzer yapılardan elde edilen sonuçlarla tutarlıdır. Projenin temel amacı

frekans çevirimi ve bant genişletilmesi gibi daha önce literatürde hiç incelenmemiş yeni tasarımlar öne sürerek ve yine bu tasarımların çalıştığını göstererek, bu tür üreteçlerin belirli ortamlarda etkinliğini artırmaktır. Bu proje ile bu amaçlara ulaşılmıştır ve ileride yürütülmesi planan yeni bir proje ile bu tasarımlardan elde edilen güç ve voltaj seviyeleri artırılması hedeflenmektedir. Bu projede geliştirilen üreteçler anlık maksimum güç ihtiyacının düşük olduğu ve sürekli bir enerji gerektirmeyen duyarga sistemlerinde kullanılabilir. Bu tür duyarga sistemlerine örnek olarak kablosuz duyarga ağları verilebilir. Bu tür duyargalar düşük güç seviyelerinde çalışabilmekte ve belirli aralıklarla radyo sinyalleriyle veri aktarımı yaparak çok düşük enerji seviyelerinde çalışabilmektedirler. Bu proje kapsamında, frekans çevirimi ve büyük kütle sarım tasarımı gibi yapıların yanında yüksek frekanslı (kHz mertebesinde) sarsıntıdan enerji üreten yapılar da göz önüne alınmıştır. Bu sistemler, otomotiv endüstrisi (motor sarsıntısı, tekerlek sarsıntısı v.s.) gibi sarsıntı frekansının çok yüksek olduğu ortamlarda kullanılabilir. Bu tür ortamlarda varolan titreşim frekans bandı dar olduğu için, geniş bantlı tasarımlar da göz önüne alınmıştır. Her ne kadar ilk bakışta, böyle bir tasarımdan elde edilen güç seviyeleri, dar bantlı yapılara göre daha düşük görünse de, dar bantlı yapıların sadece doğal frekansları etrafında etkin oldukları unutulmamalıdır. Ayrıca geniş bantlı tasarımdan elde edilen güç seviyesini, bu yapıları seri olarak bağlayarak artırmak her zaman mümkündür. Bu yapılar yüksek frekanslarda etkin olsa da, her zaman ortamda yüksek frekanslı titreşimler bulmak mümkün olmayabilir. Bu sorunu çözmek amacıyla frekans çevirimi tasarımı geliştirilmiştir. Frekans çevirim yönteminin temel amacı, düşük frekanslı titreşimleri daha yüksek seviyelere çevirerek elde edilen enerjiyi artırmaktır. Bu yöntemin etkinliği karşılaştırmalı testler yaparak kanıtlanmıştır. Üretilen gücün titreşim frekansının kübü ile doğru orantılı olduğu göz önüne alındığında, doğrudan düşük frekans da çalışan bir yapı kullanıldığında üretilen enerji ve güç miktarları önemli ölçülerde düşmektedir. Bu nedenle uygun tasarım parametreleri ile her zaman yüksek frekans da çalışan yapılar yapmak, güç ve enerji üretimi açısından daha avantajlıdır. Bu nedenle ileride frekans çevirimi yönteminin daha da ileriye götürülmesi için başka çalışmaların yapılması hedeflenmektedir.

Burada geliştirilen sistemler için önemli bir sınırlama arayüz elektronik devresi tasarımındadır. Bu sınırlama sadece sarsıntıdan enerji elde eden sistemlerde değil hemen hemen bütün mikro enerji üreteçlerinde, üretilen voltajın düşük olması nedeniyle karşılaşılan bir problemdir. Başlıbaşına bir araştırma konusu olan bu devrelerde genellikle düşük (sıfıra yakın) açılma potansiyelli diyotlar ve çarpım devreleri tercih edilmekte, bu da devrelerin üretim maliyetini önemli ölçüde arttırmaktadır. Bazı uygulamalarda ise arayüz elektroniğini çalıştıracak bir pil kullanılmakta, bu devre için harcanan statik enerji miktarı sınırlanarak (örneğin switched-capacitor devreler kullanılarak), milivolt

seviyesindeki voltajın voltlar seviyesine çekilmesi mümkün olmaktadır. Arayüz elektronik devreleri bu proje kapsamında ele alınmamıştır ancak geliştirilen tasarımların gerçek hayata uygulanabilmesi için geliştirilmeleri zorunludur.

Bu sonuçlar ışığında proje, öneri aşamasında hedeflenen amaçlarına ulaşmıştır. Proje kapsamında önceden belirlenen hedeflerin tamamına erişilmiş olmasına rağmen, elde edilen gelişmeleri daha da somut ve faydalı hale getirebilmek için ileriki dönemlerde aşağıda verilen iyileştirmelerin yapılması önerilebilir.

- **Üretim sürecinde oluşan hataların giderilmesi:** Raporun test bölümünde bahsedildiği üzere üretim sürecinde DRIE aşamasında kullanılan ısıtıcı yağ, daha sonra yeterince temizlenememekte ve seri rezonans kollarının birbirinden farklı doğal frekanslarda çalışmalarına neden olmaktadır. Ayrıca prototip kurulumu sırasında karşılaşılan hizalama hataları üreteçlerin performanslarını sınırlamaktadır. İleriki aşamalarda bu sorunların çözülmesi üreteçlerin gerçek uygulamalarda kullanılabilmesi önem taşımaktadır.
- **Üreteçlerden elde edilen güç miktarının artırılması:** Bu proje kapsamında üretilen enerji üreteçlerinin tasarımlarında litografi hassasiyeti sınırlaması nedeniyle sarım sayısı arttırılamamıştır. Sonraki aşamalarda geliştirilecek üreteçlerde sarım sayısını daha da arttıracak çözümler üzerine çalışılabilir. Bunun yanı sıra üreticinin alanını arttırmadan, kol sayısını arttırılarak verimliliğin yükseltilmesi üzerine çalışılabilir.

REFERANSLAR:

1. M. Mizuno and D.G. Chetwynd, "Investigation of a resonance microgenerator," *J. of Micromech. Microeng.*, Vol 13, pp. 209-216, 2003.
2. C.B. Williams and R.B. Yates, "Analysis of a micro-electric generator for microsystems," *Sens. and Actuators A* Vol. 52, pp. 8-11, 1996.
3. P. B. Koenaman, I.J. Busch-Vishniac and K.L. Wood, "Feasibility of micro power supplies for MEMS," *JMEMS*, Vol. 6, No. 4, pp. 355-362, Dec. 1997.
4. P. Glynne-Jones and N.M. White, "Self-powered systems: A review of energy sources," *Sensor Review*, Vol. 21, No. 2, pp. 91-97, 2001.
5. S. Roundy, "Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion," Ph. D. Thesis in Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, 2003.
6. S. Meninger, J.O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah and A.P. Chandarakasan , "Vibration-to-electric energy conversion," *IEEE Trans. on VLSI Systems*, Vol. 9, No. 1, pp. 64-76, 2001.
7. R. Amirtharajah and A.P. Chandarakasan, "Self-powered signal processing using vibration based power generation," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 22, May 1998.
8. T. Sterken, P. Fiorini, K. Baert, R. Puers and G. Borghs, "An electret-based electrostatic micro-generator," *Digest of Transducers 2003*, pp. 1291-1295
9. F. Peano and T. Tambosso, "Design and optimization of a mems electret-based capacitive energy scavenger," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 14, No. 3, pp. 429-435, 2005.
10. Roundy et al., "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes," *Computer Communications*, vol. 26, pp. 1131-1144, 2003.
11. S. Roundy, P.K. Wright, J. Rabaey, "Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters," *ASME IMECE*, New Orleans, Louisiana, 2002.
12. A. Nounou and F. Ragaie, "A lateral comb-drive structure for energy scavenging," *Electrical, Electronic and Computer Engineering, ICEEC '04 International Conference*, pp. 553 – 556, 2004.
13. P.D. Mitcheson, P. Miao, B.H. Stark, E.M. Yeatman, A.S. Holmes and T.C. Green, "MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation," *Sensor and Actuators A*, vol. 115, pp. 523-529, 2004.

14. Sterken et al., "An electret based electrostatic μ -generator," 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, pp. 1291-1294, 2003.
15. S. Meninger, J.O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A.P. Chandarakasan and J. Lang, "Vibration-to-electric energy conversion," Low Power Electronics and Design, International Symposium, Vol. 9, No. 1, pp. 48-53, 1999.
16. S. Roundy, P.K. Wright and V. Sundrarajan, "Improving power output for vibration-based energy scavengers," Pervasive Computing, IEEE vol. 4, issue 1, Jan.-March 2005, pp. 28-36.
17. P. Glynne-Jones, S.P. Beeby and N.M. White, "Towards a piezoelectric vibration powered microgenerator," IEE Proceedings on Measurement Technology, vol. 148, no. 2, pp. 68-72, 2001.
18. G. Poulin, E. Sarraute and F. Costa, "Generation of electrical energy for portable devices, Comparative Study of electromagnetic and piezoelectric system," Sensors and Actuators A, vol. 116, pp. 461-471, 2004.
19. T. Sterken, K. Baert, C. Van Hoof, R. Puers, G. Borghs and P. Fiorini, "Comparative modeling for vibration scavengers," Sensors, Proceedings of IEEE, vol. 3, pp.1249-1252, 2004.
20. S. Shecnk and A. Paradiso, "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics," IEEE Micro, vol.21, issue 3, pp. 30-42, 2001.
21. S. Roundy, B.P. Otis, Y.H. Chee, J.M. Rabaey, P.K. Wright, "A 1.9 Ghz transmit beacon using environmentally scavenged energy," ISPLED 2003, August 25-27, 2003, Seoul Korea.
22. H. Kulah and K. Najafi, "Energy Scavenging from Low-Frequency Vibrations by Using Frequency Up-Conversionfor Wireless Sensor Applications," IEEE Sensors Journal, Vol.8, No.3, pp. 261-268, March 2008. (doi:10.1109/JSEN.2008.917125)
23. H. Kulah and K. Najafi, "An Electromagnetic Micro Power Generator for Low-Frequency Environmental Vibrations," International Conference on Microelectromechanical Systems (MEMS'04), pp. 237-240, January 2004.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 104E119
Proje Başlığı: MEMS Tabanlı Enerji Üretimi
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Y. Doç. Dr. Haluk Külâh, Prof. Dr. Tayfun Akın
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1 Ağustos 2005 – 31 Temmuz 2008
Öz (en çok 70 kelime) Bu araştırma projesinin amacı MEMS teknolojisi kullanarak mikroişlenmiş sistemler ve entegre devreler için gerekli güç üretimini sağlayacak çip tasarlamaktır. Güç üretiminin herhangi bir ekstra kaynak kullanılmadan, sadece ortamda var olan sarsıntının elektrik enerjisine çevrimi ile elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede uzun ömürlü, kendi başına çalışabilen kablosuz duyarğa sistemlerinin geliştirilmesi mümkün olacaktır. Bu çalışmada dört özgün tasarım geliştirilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Micro güç üreteçleri, Enerji toplama, Frekans çevirimi, MikroElektroMekanik Sistemler (MEMS).
Projeden Yapılan Yayınlar: <ol style="list-style-type: none">1. İ. Sarı, T. Balkan, and H. Külâh, "An Electromagnetic Micro Power Generator for Wideband Environmental Vibrations," <i>Sensors and Actuators Journal A</i> 145-146, pp. 405-413, July-August 2008.2. İ. Sarı, T. Balkan, and H. Külâh, "A Wideband Electromagnetic Micro Power Generator for Wireless Microsystems," <i>International Conference on Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems (TRANSDUCERS'07)</i>, pp. 275-278, 2007.3. İ. Sarı, T. Balkan, and H. Külâh, "Design and Optimization of an Electromagnetic Micro Energy Scavenger with Parylene Cantilevers," <i>PowerMEMS Conference 2007</i>, pp. 745-746, November 2007.4. İ. Sarı, T. Balkan, and H. Külâh, "An Energy Harvesting MEMS Frequency Detector," <i>IEEE Sensors Conference 2007</i>, pp. 1460-1463, October 2007.5. İ. Sarı, T. Balkan, and H. Külâh, "A Micro Power Generator with Planar Coils on Parylene Cantilevers," Accepted to <i>IEEE Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME) Conference</i> as an oral presentation, Istanbul, June 2008.6. İ. Sarı, "Design, Fabrication, and Implementation of A Vibration Based MEMS Energy Scavenger for Wireless Microsystems," Ph. D. Thesis, ODTÜ, September 2008.7. İ. Sarı, T. Balkan, and H. Külâh, "Sarsıntıdan Elektrik Enerjisi Üreten Mikro Enerji Üreteçleri," <i>ODTÜLÜ Dergisi</i>, Ağustos, 2008.8. İ. Sarı, T. Balkan, and H. Külâh, "An Electromagnetic Micro-Energy Harvester with Parylene Cantilevers," submitted to <i>Journal of Micromechanics and Microengineering</i>.9. İ. Sarı, T. Balkan, and H. Külâh, "A Frequency Up-Conversion Based Electromagnetic Micro-Energy Harvester," submitted to <i>IEEE Journal of MEMS</i>.10. İ. Sarı, T. Balkan, and H. Külâh, "An Electromagnetic Micro Power Generator For Low Frequency Environmental Vibrations Based On The Frequency Up-Conversion Technique," submitted to <i>IEEE MEMS 2009 conference</i>.