

# LORENTZ KUVVETİ TABANLI, TINLAYAN ve TİTREŞİM GENLİĞİ ÖLÇÜMÜ İLE ÇALIŞAN BİR MEMS MANYETOMETRE

*Kıvanç AZGIN\**

Alınma: 04.07.2017; düzeltme: 19.09.2017; kabul: 22.09.2017

**Öz:** Bu çalışmada titreşim genliği ölçümü ile çalışan Lorentz kuvveti tabanlı ve algılayıcısı tınlayan MEMS yük hücresi olan bir manyetometre sunulmaktadır. Manyetometre, tarak elektrotlara sahip Çift Bağlı Diyapazon (ÇBD) bir tınlatıcı ile, uçlarından ve ortalarından birbirlerine bağlanmış kirişlerden oluşan bir ızgara yapısından oluşmaktadır. Izgara yapısı, üzerinden geçen akımla Lorentz kuvvetini oluştururken, elektriksel direncin ve yapının sıcaklığının yükselmesini engellemektedir. Maksimum hassasiyet için yapının genlik frekans tepkisinin eğiminin en büyük olduğu tahrik frekansı seçilmiştir. Manyetometre standart SOI (Yalıtkan-Üzeri-Silisyum) mikro-işleme teknikleri kullanılarak 35µm yapısal kalınlıkla üretilmiştir. Yapılan frekans tepkisi testinde ÇBD yapısının tınlaşım frekansının 63812,1 Hz ve 0,2 mTorr'daki kalite faktörünün de 5950 olduğu belirlenmiştir. Testler yapıya dik olarak oluşturulan 30mT manyetik alan altında, 100 mA ızgara akımı ve 70mV tahrik genliği ile yapılmıştır. Manyetometrenin orantı katsayısı 113.7 mV/T ve çözünürlüğü 965 µT/Hz<sup>1/2</sup> olarak ölçülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Manyetometre, ÇBD (Çift Bağlı Diyapazon), MEMS, Lorentz Kuvveti, Genlik Ölçümü

## A Resonant MEMS Lorentz Force Based Magnetometer with Amplitude Detection

**Abstract:** This study presents a Lorentz force magnetometer based on vibration amplitude detection with a resonant MEMS load cell structure as a sensor. Magnetometer is composed of a DETF (Double-Ended Tuning Fork) resonator with comb type electrode and a grill structure formed by beams connected from their centers end ends. The grill structure reduces electrical resistance and prevents overheating while generating the Lorentz force. For maximum sensitivity, the maxima of the slope of the magnitude response is chosen for excitation frequency. The proposed sensor is fabricated using a standard SOI micromachining processes with a device layer thickness of 35 µm. The resonance frequency of the DETF is measured to be 63812,1 Hz, Q-factor of 5950 at around 0.2 mTorr ambient pressure. Tests are done for 30 mT magnetic field normal to the resonator plane, with the grill current of 100 mA and excitation amplitude of 70mV. The scale factor of the magnetometer is measured to be 113.7 mV/T with a resolution of 965 µT/Hz<sup>1/2</sup>.

**Keywords:** Magnetometer, DETF, MEMS, Lorentz Force, Amplitude Detection

## 1. GİRİŞ

Manyetik alan algılayıcılarının, kullanım alanlarına bağlı olarak, vektörel ve skaler olmak üzere iki ana türü bulunmaktadır. Vektörel manyetik alan algılayıcıları manyetik alanın yönünü ve büyüklüğünü birlikte belirleyebildikleri için özellikle seyrüsefer ve yön bulma uygulamalarında çokça kullanılmaktadırlar. Bu pusulalar ataletsel algılayıcılarla (dönüölçerler ve ivmeölçerler) birleştirilerek ataletsel ölçüm birimleri (AÖB) elde edilmektedir. Ataletsel

\* ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara  
İletişim Yazarı: Kıvanç AZGIN (azgin@metu.edu.tr)

ölçüm birimlerinde kullanılan pusulalar genelde akı kapısı (flux gate), arama bobini (search coil), Hall etkisi (Hall effect) veya manyetorezistif tabanlı manyetik algılayıcılardan oluşur. Bu ataletsel ölçüm birimlerinin de, hassasiyetlerine bağlı olarak, cep telefonlarından hassas güdüm sistemlerine kadar çok geniş bir yelpazede kullanım alanı mevcuttur.

Özellikle MEMS (Mikroelektromekanik Sistemler) manyetometrelerin ataletsel algılayıcılarla tümleşik ve hizalı üretilebilmesi, hem üretim maliyetini hem de yonga boyutunu en aza indirmek açılarından çok önemlidir. Halihazırda var olan MEMS ivmeölçer ve dönüölçer üretim tekniklerinin MEMS manyetometreler için de kullanılabilmesi, tek alttaş (substrate) üzerinde bir ataletsel ölçüm biriminin üretilebilmesini beraberinde getirmektedir.

İlk MEMS manyetometrelerden bazılarında kalıcı mıknatıslar kullanılmıştır (Yang ve diğ., 2002). Çalışma prensibi standart mıknatıslı pusulalara çok benzeyen bu yöntemde yapıdaki kalıcı mıknatısın ortamdaki manyetik alanla etkileşime girmesi sonucu yapıda bir esneme olmaktadır. Daha sonra bu esneme optik, kapasitif veya elektron tünellemesi yöntemleriyle ölçülebilmektedir. Elektron tünellemesi yönteminin denendiği bir çalışmada  $300 \text{ pT/Hz}^{1/2}$  hassasiyetinde MEMS manyetometrelerin yapılabildiği bildirilmiştir (DiLella ve diğ., 2000). Kalıcı mıknatısların kullanıldığı bu çalışmalarda çok farklı malzemeler kullanılabilir (Niarchos, 2000) fakat ardıl izlem (hysteresis) sorununa yapısal bir çözüm bulunamamaktadır. Bunların yanında çok eksenli uygulamalarda eksenler arası etkileşimin de performansı etkilediği görülmüştür (Ettelt ve diğ., 2013).

Lorentz kuvveti temelinde çalışan MEMS manyetometreler, diğer manyetometre türleriyle karşılaştırıldığında ardıl izlemsiz (hysteresis free) olması, özel malzemelere ve kaplamalara ihtiyaç duymaması ve diğer MEMS ataletsel algılayıcılarla serim seviyesinde tümleştirilebilmesi (monolithic integration) açılarından oldukça avantajlıdır. Lorentz tabanlı MEMS manyetometrelerin ilk örneklerinden birisi dönüsel rezonatör yapısıdır (Kadar ve diğ., 1998). Bu yayında tınlatici (rezonatör) kütlesi üzerindeki iletken hatlardan geçirilen ve frekansı yapının dönüsel rezonans frekansına eşit olan akımın sonucunda oluşan Lorentz kuvveti yapıyı mekanik rezonansa sokar. Ortamdaki yatay manyetik alanın şiddetine bağlı olarak değişen Lorentz kuvveti de bu rezonansın genliğini değiştirir. Genliğin yarattığı kapasitans değişiminin hassas bir şekilde ölçülmesiyle yatay manyetik alan şiddetini ölçmek mümkün olur. Çalışmada  $30 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$  hassasiyetine ve  $40000 \text{ V/T}$  oranı katsayısına (scale factor) ulaşıldığı raporlanmıştır. Benzer yapıya sahip fakat esnemelerin rezistif mikro yük hücreleri (load cell) ile ölçüldüğü bir yaklaşım da literatürde bulunmaktadır (Herrera-May ve diğ., 2010). Yine benzer bir örneğin standart CMOS entegre devre üretim teknolojisinde üretilebildiği de gösterilmiştir (Eyre ve diğ., 1998). Titreşen yapı olarak mikro ksilofon çubukların kullanıldığı bir başka örnekte ise hassasiyetin  $4560 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$  olduğu bildirilmiştir (Wickenden ve diğ., 2003).

MEMS manyetometrelerin doğrusal titreşimlerin kullanıldığı türleri de bulunmaktadır. Katlanmış yay yapılarının (folded springs) üzerinden geçirilen akımla mekanik rezonansa sokulan bir örnekte hassasiyet  $200 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , oranı katsayısı da  $820 \text{ V/T}$  mertebesinde (Emmerich ve Schofthaler, 2000). Dikdörtgen bir çerçeve üzerinde oluşturulan bobin benzeri yapılardan geçen akımın yarattığı Lorentz kuvvetiyle rezonansa tutulan bir başka çalışmada (Kyynarainen ve diğ., 2008), sarım sayısı artırılabilirdiği için hassasiyette, oranı katsayısında ve dinamik çalışma aralığında (dynamic range) ayarlamalar yapılabilmektedir. Benzeri bir yapının optik okuma yöntemiyle çalıştırıldığı örnekler de vardır (Keplinger ve diğ., 2004).

Mekanik tınlaticıların titreşim genlikleri yanında titreşim frekanslarındaki değişimler de algılayıcı teknolojilerinde sıkça kullanılmaktadır. Manyetik alan şiddetine bağlı olarak frekansı değişen fakat özel kaplamalara ihtiyaç duyan bir algılayıcı yapısı da literatürde bulunmaktadır (Brugger ve Paul, 2008). Manyetik alan yoğunlaştırıcılarının kullanıldığı bu yayında, mekanik tınlaticının mekanik yay sabiti, yoğunlaştırılan manyetik alan tarafından azaltılmakta ve böylece alan şiddeti ölçülebilmektedir, fakat manyetik alanın yönünü ayırtıramamaktadır. Lorentz kuvvetinin kullanıldığı bir diğer örnekte ise, üzerlerinden zıt yönde akan akımların gerdiği veya sıkıştırdığı tınlatici yapıları kullanılmıştır (Bahreyni ve Shafai, 2005). Bu gerilme veya sıkışma,

tnlatıcının yay sabitini, dolayısıyla da tnlaticının frekansını değiştirmektedir. Çalışma prensibi, akort edilen bir gitar telinin frekans değişimi ile aynıdır. Bu yöntemle yapının çalışması esnasında istenmeyen frekans kaymalarının olduğu görölmüş ve nedenleri de aynı yayında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Hem yapının üzerinde bulunduğu alttaşın sıcaklığındaki değişmeler (dışsal), hem de geçirilen akımın yarattığı ısınmanın (içsel) sınırladığı bir hassasiyeti olduğu gösterilmiştir.

Sıcaklığın yanında ivme hassasiyeti de kritik bir sorun olarak MEMS algılayıcıların hemen hepsinde dikkate alınmaktadır. Mekanik yapıların yaylarla havada tutulduğu yaklaşımların tamamında, az veya çok, ivme hassasiyetinden bahsedilebilmektedir. Sıcaklık değişimlerinin yanında dışsal ivmelerin (Mo ve diğ., 2013) ve yapıların maruz kaldığı şokların da MEMS manyetometrelerin üzerindeki etkileri (Yee ve diğ., 2002) ,çok detaylı olmasa da incelenmiştir. İvme, yapıda mekanik gerilim yaratarak yada algılama mekanizmasında (kapasitif plakalar, optik sistemler, vb.) esnemelere neden olarak çıkış üzerinde değişmelere sebep olmaktadır. Dışsal ivmelerin etkilerinin incelendiği birçok yayın bulunmakla birlikte, özellikle tnlaticı yapılarında bu etkilerin bastırılmasının da çeşitli yolları bulunmuştur. En etkili yöntemlerden birisi, rezonatörün alttaşa bağlandığı çapa (anchor) noktalarının yapıyı simetrik bir şekilde desteklemesinin sağlanmasıdır (Jha ve diğ., 2008). Bu tnlaticı yapısı, çok hassas kuvvet algılayıcısı (Azgin ve Valdevit, 2013) olarak da kullanılan bir Çift-Bağlı-Diyapazon (ÇBD) tnlaticısıdır.

ÇBD, iki özdeş diyapazonun ucuca birleştirilmesiyle elde edilen bir tnlaticı yapısıdır. Yapısal olarak yan yana konumlanmış özdeş iki gitar teli ile benzeşir. Yapıya ekstenel bir yükleme geldiğinde, ÇBD'yi oluşturan kirişlerin etkin yay sabitleri, kirişler üzerinde oluşan gerilmeler nedeniyle değişir . Bu yay sabiti değişimi de doğrudan mod şekillerinin frekanslarını etkiler. Gitar teli örneğinde akort başlarıyla teller gerildiğinde notaların tizleşmesi ile aynı mekanizma temelini paylaşır; tek fark ÇBD yapısında teller yerine kirişler kullanıldığından, hem basma hem de çekme gerilmeleri uygulanabilir. Bu gerilmeler de kirişleri sürekli rezonansta titreştirerek ve bu titreşimin frekansını gözleyerek ölçülebilir. Yapıyı seğilen mod şeklinin tnlalışımında titreştirmek için ise bir sürüş ve algılama döngüsünün olması gerekir. Bu nedenle ÇBD yapısında kirişlerin birbirlerine ters yönde hareket ettikleri mod şekli esas mod şeklidir. Bu mod şekli sayesinde daha yüksek kalite faktörü (Q factor) elde edilir ve yapısal olarak daha az yer kaplar.

Makro boyutlu ÇBD yapısı ilk olarak 1970'lerin başlarında hassas basınç algılayıcılarında (Paros, 1973 ve Ueda ve diğ., 1985), daha sonra da hassas tartılardaki yük hücrelerinde (Erdem, 1982 ve Zulliger, 1983) hassas ölçümler için kullanılmıştır . Bu yük hücrelerinde titreşim için genelde elektromanyetik sürüş ve algılama tekniklerinin kullanıldığı görölmektedir. Kuvars kristalinin piezoelektrik özelliği ve ısıl kararlılığından faydalanan tasarımlar da hassas tartı ve kuvvet algılayıcılarının duyarlarında kullanılmıştır (Tilmans ve diğ., 1992). Malzeme testleri için kullanılan rezonant yük algılayıcıları ise ilk olarak makro boyutta uygulanmıştır (Cheshmehdoost ve diğ., 1991). Silisyum işleme tekniklerindeki gelişmeler (Blom ve diğ., 1989, Howe ve diğ., 1996 ve Van Mullem ve diğ., 1992) ve eyleme/algılama sistemlerindeki basit ama çok başarılı tasarımlar (Tang ve diğ., 1989) sonucunda, mikro işlenmiş tnlalışan kuvvet algılayıcıları ilk olarak ivmeölçerler için tasarlanmışlardır (Chang ve diğ., 1990) ve Roessig ve diğ., 1997). Sonradan ÇBD yapısının minyatür dönüölçer (Seshia ve diğ., 2002) ve gerinim pulu (Wojciechowski ve diğ., 2004) uygulamaları için de uygulanabilir bir tasarım olduğu ortaya çıkmıştır. ÇBD yapısında, zıt fazlı mod şekli için tnlalışım frekansının uygulanan eksensel kuvvetle olan ilişkisi doğrusal kabul edilebilir (Torrents ve diğ., 2010). Yapı tnlalışımda tutulabilir ve frekansı sürekli sayılabilirse, yapının üzerindeki yüklenme hassas bir şekilde okunabilmektedir. ÇBD yapısına sahip yük hücrelerinin çeşitli MEMS üretim teknolojileriyle üretilebildiği literatürde gösterilmiştir (Lee ve diğ., 2008 ve Myers ve diğ., 2009).

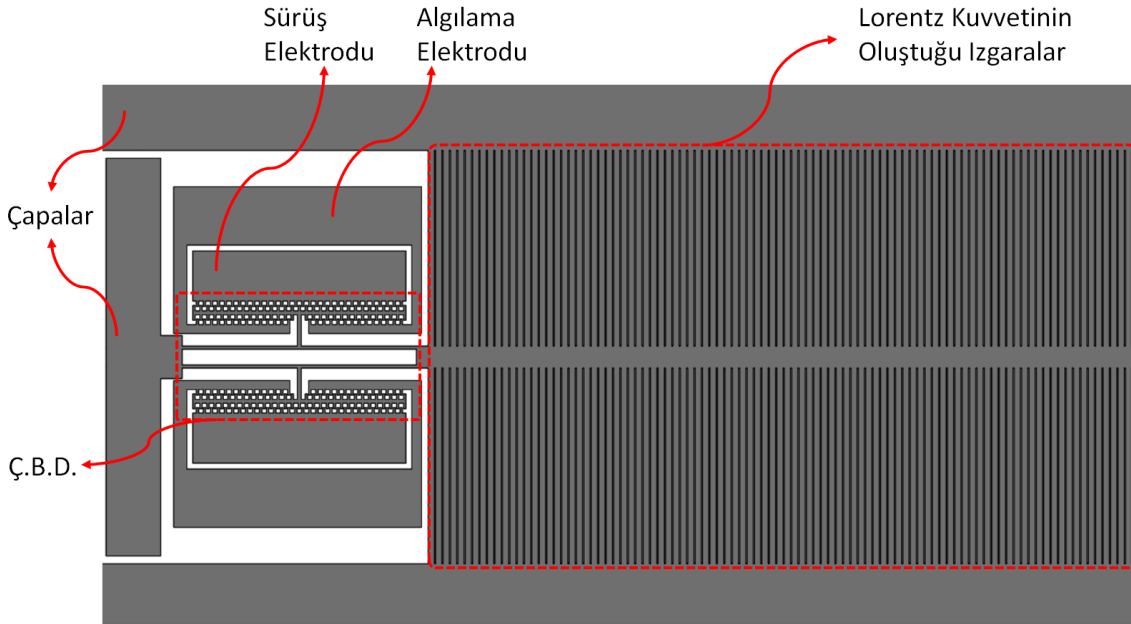
Teorisi ve makro uygulamaları 1970'lere dayanan ÇBD yapılarının MEMS üretim teknikleriyle üretimi, bu yapı temelinde geliştirilen birçok uygulamanın önünü açmıştır.

Günümüzde MEMS teknolojisiyle ÇBD tabanlı yapılan algılayıcılar arasında gerinim pulları (strain gauge), ivmeölçerler, dönüölçerler, yük hücreleri gösterilebilir. Bu çalışmada Lorentz kuvvetini ölçmek için bir ÇBD yapısının seçilmesinin sebebi de ÇBD yapılarının geniş dinamik menzili (çalışma aralığının hassasiyete oranı) ve yüksek hassasiyetidir.

Lorentz kuvveti tabanlı tınlaşan MEMS manyetometrelerde ölçülecek manyetik alanın yapıda oluşturduğu Lorentz Kuvveti, ÇBD yapısında basma veya çekme gerinimleri uygulayarak ÇBD'nin zıt fazlı mod şeklinin frekansını kaydırmaktadır. Bu frekansın sayılması ile doğrudan manyetik alan şiddeti bulunabileceği gibi (Pala ve diğ., 2016) ÇBD sabit bir frekanstaki tahrik ile sürülüp genlik tepkisi izlenerek de manyetik alanın şiddeti ve yönü bulunabilir. Sabit frekanslı tahrik altında genlik tespiti Çift Frekanslı Tınlaşım Takipli Atomik Kuvvet Mikroskoplarının (Rodriguez ve diğ., 2007) temel çalışma prensibini oluşturur. Bu çalışmada, ÇBD tabanlı bir Lorentz Kuvveti tabanlı tınlaşan bir MEMS manyetometrenin sabit frekanslı tahrik altında genlik tespiti ile çalıştırılması incelenmektedir.

## 2. ÇBD Tabanlı MEMS Manyetometre Yapısı

Şekil 1'de bu çalışmada incelenen ÇBD tabanlı MEMS Manyetometrenin yapısal bölümleri görülebilir. Yapının çalışma prensibi, ızgaralardan geçirilen belirli bir akımın yapının düzlemine dik yöndeki manyetik alan ile etkileşerek, oluşan Lorentz kuvvetinin ÇBD yapısıyla algılanması ile özetlenebilir. Izzaralar üzerine binen bu kuvvet, ızgaraları ortasından destekleyen ÇBD kirişlerini yükleyerek bu kirişlerin tınlaşım frekansının değişmesine neden olur. Tınlaşım frekansındaki kaymanın hassas bir şekilde algılanmasıyla yapının düzlemine dik yöndeki manyetik alanın yönü ve büyüklüğü ölçülebilir.

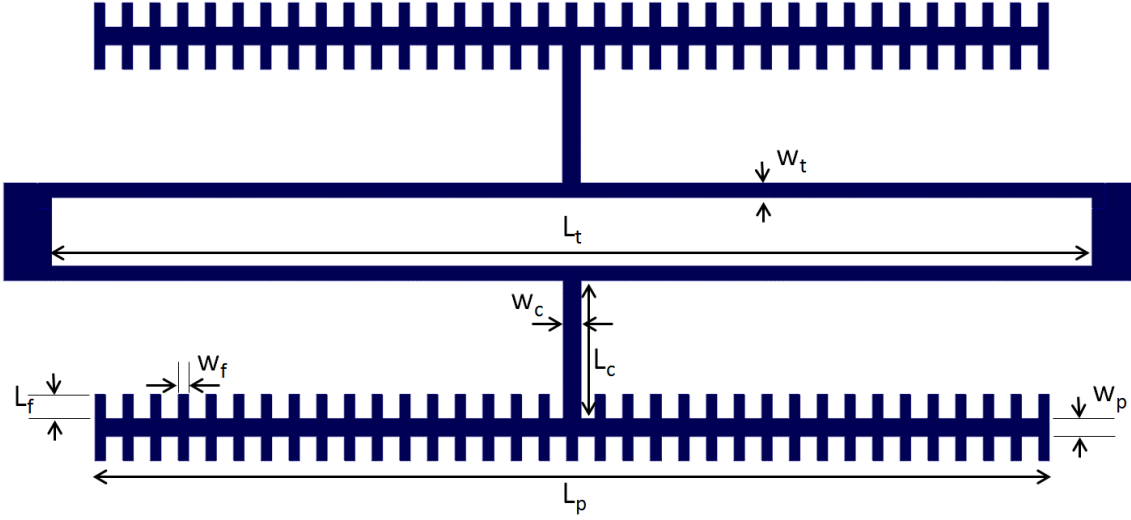


Şekil 1:

Bu çalışmada incelenen ÇBD tabanlı MEMS Manyetometrenin yapısal bölümleri.

Hassasiyetin artırılabilmesi için ÇBD (Çift Bağlı Diyapozon) yapılarının boyutlarının istenen hassasiyetteki kuvveti algılayabilecek şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için kiriş uzunluğu ( $L_t$ ), kiriş eni ( $w_t$ ), taraklı kapasitif plaka uzunluğu ( $L_p$ ), kapasitif plaka eni ( $w_p$ ), tarak parmakları arası kapasitif açıklık ( $g$ ), ara parça boyu ( $L_c$ ), ara parça eni ( $w_c$ ), tarak elektrotlarının parmak uzunluğu ( $L_f$ ) ve eni ( $w_f$ ), her bir elektrodaki parmak sayısı ( $n$ ), yapının

kalınlığı ( $h$ ), polarizasyon voltajı ( $E_c$ ) ve yükseltici direnci ( $R$ ) değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 2’de bu boyutların karşılık geldiği geometriler görülebilir.



**Şekil 2:**  
*Tarak elektrotlu bir ÇBD'nin yapısal boyutlandırması.*

ÇBD yapısının tınlaşım frekansının belirlenebilmesi için yapıyı oluşturan kirişlerin ve kirişlere bağlı elektrotların etkin yay sabitinin ve etkin kütesinin belirlenmesi gerekmektedir. Torrents ve diğ. (2010) etkin yay sabitinin (1) ve etkin kütenin denklemlerini paralel plakalı elektrotlar için ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada tarak yapılı elektrotlar kullanıldığı için etkin kütle denkleminde (2) parmak yapılarının kütleleri eklenmiştir.

$$k_{E,t} = 192 \frac{EI}{L_t^3} + 2.4 \frac{F}{L_t} \quad (1)$$

$$m_{E,t} = \rho h \left( \frac{13}{35} w_t L_t + w_c L_c + (w_p L_p + n w_f L_f) \right) \quad (2)$$

Denklem (1) de  $F$  iki kirişe uygulanan toplam eksenel yüklemidir. Bu kuvvet, elektrotlar üzerinden oluşturulan ve ÇBD yapısının titretilmesini sağlayan tahrik olan  $F_t$  ile karıştırılmamalıdır.

Yük altındaki kirişlerin hassasiyetlerinin maksimize edilebilmesi için kirişlerin yapı düzleminde ve birbirlerine zıt fazlı titretildikleri mod şekli seçilmektedir. Eş fazlı ve zıt fazlı mod şekillerinin frekanslarının detaylıca çalışıldığı yayında (Azgın ve Valdevit, 2013) bu iki mod şeklinin frekansının farkının bir tek kirişinkinden pek farklı olmadığı gösterilmiştir. Denklem (3), zıt fazlı mod şeklinin doğal frekansını verir. Düşük sönümlenmeli uygulamalarda (yüksek vakum ortamında) tınlaşım frekansı doğal frekansa çok yakın olduğundan bu denklem tınlaşım frekansının denklemi olarak da alınabilir.

$$\omega_{n,f} = \sqrt{\frac{k_{E,t}}{m_{E,t}}} = \sqrt{\frac{192 \frac{EI}{L_t^3} + 2.4 \frac{F}{L_t}}{\rho h \left( \frac{13}{35} w_t L_t + w_c L_c + (w_p L_p + n w_f L_f) \right)}} \quad (3)$$

Denklem (4) de zıt fazlı mod şeklinin tınlama frekansının, ÇBD yapısına uygulanan eksenal  $F$  kuvvetine bağlı değişimini vermektedir.

$$\frac{\partial \omega_{n,zf}}{\partial F} = \frac{1.2}{\omega_{n,zf} m_{E,t} L_t} \quad (4)$$

Pala ve diğ. (2016) çalışmamızda doğrusallığı düşük fakat sinyal/gürültü oranı daha yüksek olan paralel plakalı versiyonunu çalıştığımız bu ÇBD yapısına tarak elektrotların tatbik edilmesiyle genlik tabanlı okuma için gerekli doğrusallığı sağlamayı hedefledik. Paralel plakalardaki doğrusal olmayan elektrostatik negatif yay etkisinin tarak yapılarda olmaması dolayısıyla bu yapının daha geniş frekans bandında çalışması beklenmektedir. Tablo 1'deki boyutlar ve değişkenler de bu çalışmada incelediğimiz tarak elektrotlu bu yapının boyutları ve değişkenleridir.

**Tablo 1.** Tasarlanan manyetometrenin ÇBD boyutları, polarizasyon voltajı ve yükseltici direnci değerleri.

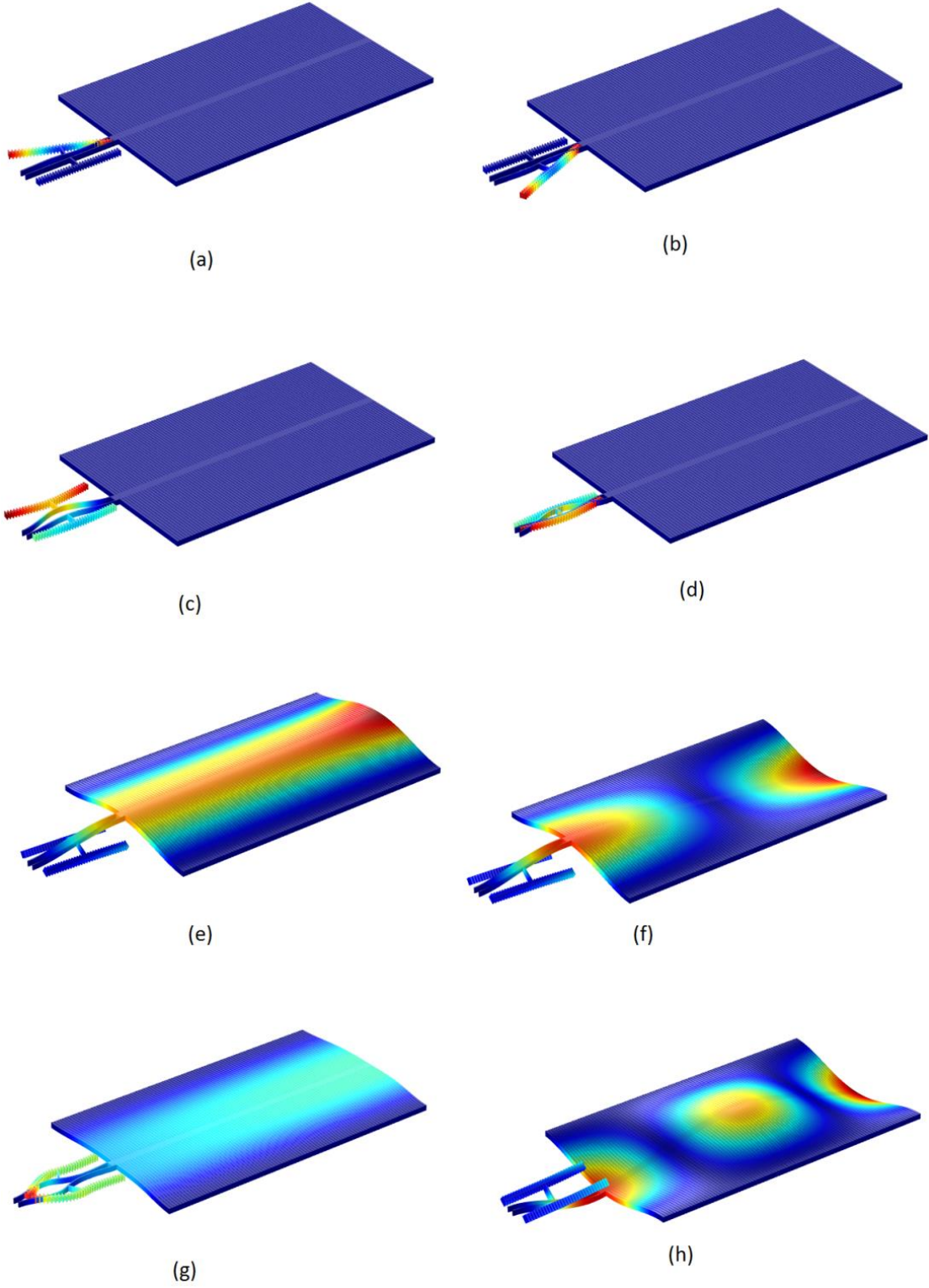
Parametre	Sembol	Değer (µm)
Kiriş uzunluğu	$L_t$	600
Kiriş eni	$w_t$	8
Tarak elektrot uzunluğu	$L_p$	550
Tarak elektrot eni	$w_p$	8
Kapasitif açıklık	$g$	2
Ara parça boyu	$L_c$	80
Ara parça eni	$w_c$	10
Yapının kalınlığı	$h$	35
Tarak elektrot parmak uzunluğu	$L_f$	14
Tarak elektrot parmak eni	$w_f$	6
Her elektrottaki parmak sayısı	$n$	69
Polarizasyon Voltajı	$E_C$	15V
Yükseltici Direnci	$R$	1 MΩ

Denklem (1), (2), (3) ve (4) kullanılarak Tablo 1'deki boyutlar ve değişkenlere sahip yapının yaklaşık 225,7 N/m etkin yay sabitine, 1,132 µgr etkin kütleyle, 71065,3 Hz yüksüz tınlama frekansına ve 630,0 kHz/N orantı katsayısına sahip olduğu hesaplanmaktadır.

## 2.1. Yapının Sonlu Eleman Analizi

ÇBD tabanlı yük hücrelerinin tasarımında dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta da yapının diğer mod şekillerinin birbirleriyle etkileşmemesinin sağlanmasıdır. Bu genellikle sonlu eleman analizi kullanılarak kontrol edilmekte ve gerekli yapısal ayarlamalar yapılmaktadır. Şekil 3'te manyetometre yapısının mekanik mod şekilleri ve karşılık gelen frekansları gösterilmiştir. Kardeş modlar olarak da adlandırılan (c) ve (d) modları (elektrotların eş fazlı titreşimleri (c) modu ve zıt fazlı titreşimleri (d) modu) düzlem içi modlardır. Frekansları analitik modelde (Denklem (3)) yaklaşık %3 hata ile hesaplanan bu modlar, aynı esneme şeklinin farklı zayıf etkileşimi ile olduğundan, frekansları birbirlerine çok yakındır (Azgın ve Valdevit, 2013). Genellikle bu modlardan zıt fazlı olan tercih edilir. Bunun sebebi yüklem altında simetrik esnemenin olası bir bükülmeyi zorlaştırması ve alttaşı iletilen kuvvetlerin minimuma indirilmesini sağlamasıdır. Zıt fazlı mod şeklinin eş fazlı olandan ayırt edilebilmesi için sürüş ve

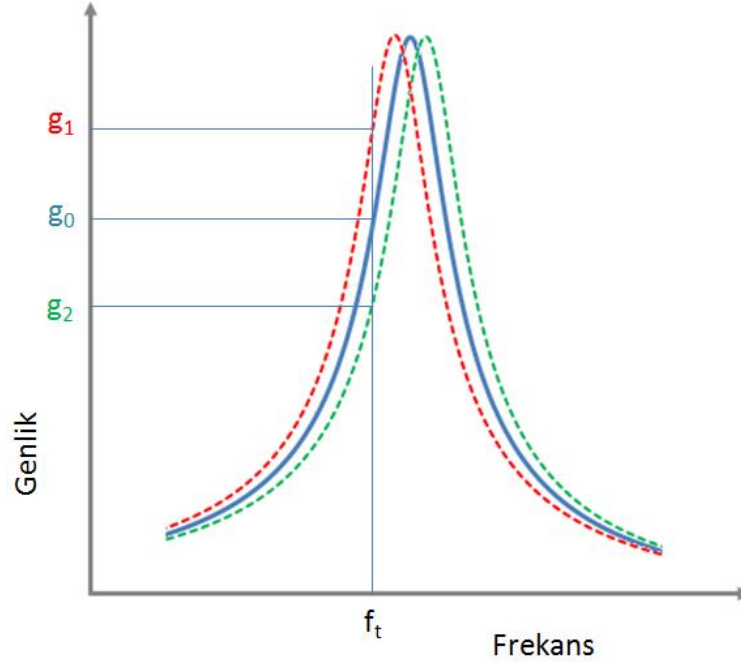
algılama elektrotlarının bağlantısı dikkatli yapılmalıdır. Testler bölümünde bu bağlantılar gösterilmiştir.



**Şekil 3:**  
Manyetometre yapılarının mekanik mod şekilleri ve frekansları (kHz)  
(a) 53.4, (b) 53.6, (c) 69.2, (d) 69.3, (e) 223, (f) ) 226, (g) 228 ve (h) 238.

## 2.2. Maksimum Genlik Hassasiyetindeki Tahrik Frekansı

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, bir ÇBD yapısının eksensel yüklenmesiyle yapının zıt fazlı düzlem içi mod şeklinin tınlaşım frekansı değişmektedir. Frekans basma yükü arttıkça azalmakta, çekme yükü arttıkça artmaktadır. Denklem (4) bu orantı katsayısını ortaya koyar. Yapıya uygulanan eksensel kuvvet, yapıyı sürekli tınlaşım halinde tutarken frekansını sayarak ölçülebileceği gibi, yapı sabit bir frekansta tahrik edilirken genlikteki değişimin takibi ile de ölçülebilir. Şekil 4'te sabit bir frekansta ( $f_t$ ) tahrik edilen yapının, değişen tınlaşım frekansı nedeniyle titreşim genliğinde meydana gelen değişim gösterilmektedir.



**Şekil 4:**

*Sabit bir frekansta ( $f_t$ ) tahrik edilen yapının titreşim genliğinde, değişen tınlaşım frekansı nedeniyle meydana gelen değişim.*

Şekil 4'te de görüleceği üzere, tahrik frekansı belirli bir aralıkta kaldığı sürece yüksek hassasiyetli bir okuma yapmak mümkün olmaktadır. Bunun nedeni çok küçük bir frekans kaymasının yüksek bir sinyal değişimine neden olmasıdır. Yöntemin dezavantajı da çok dar bir frekans bandında doğrusal çalışması, bu bandın dışında doğrusallığını çabucak kaybetmesidir. Ancak ölçülecek manyetik alan şiddeti aralığı için algılayıcının tasarımı bu dar frekans bandı yeterli olacak şekilde yapılabilir.

Elektrostatik tahrik kuvveti ( $F_t$ ) ile normalize edilen titreşim genliğinin ( $G$ ) etkin yay sabiti, etkin kütle ve etkin sönümlenme katsayısı ile olan ilişkisi Denklem (5)'te verilmiştir:

$$\left| \frac{X}{F_t} \right| = |G| = \frac{1}{\sqrt{(k_{E,t} - m_{E,t}\omega^2)^2 + (c_{E,t}\omega)^2}} \quad (5)$$

Genlik tabanlı ölçümde genliğin etkin yay sabitindeki kaymaya bağlı olarak en çok değiştiği (yapının söz konusu modunun frekans tepkisinin eğiminin maksimum ve minimum olduğu) tahrik frekansları seçilirse mümkün olan en yüksek orantı katsayısına ulaşılır. Bunun için ÇBD yapısının tahrik frekansına bağlı genliğinin eksensel yüklemeye göre ikinci türevinin sıfır olması gerekmektedir:



$$\frac{\partial^2}{\partial F^2} |G| = \frac{\partial k_{E,t}}{\partial F} \frac{\partial}{\partial k_{E,t}} \left[ \frac{\partial k_{E,t}}{\partial F} \frac{\partial}{\partial k_{E,t}} |G| \right] = 0 \quad (6)$$

Etkin yay sabitinin eksensel yüklemeye göre türevi de denklem (7)'de verilmiştir;

$$\frac{\partial k_{E,t}}{\partial F} = \frac{2.4}{L_t} \quad (7)$$

Denklem (6) açık yazılırsa aşağıdaki denkleme ulaşılır:

$$\frac{\partial^2}{\partial F^2} |G| = \left( \frac{2.4}{L_t} \right)^2 \frac{\partial^2}{\partial k_{E,t}^2} |G| = - \left( \frac{2.4}{L_t} \right)^2 \frac{\left( (c_{E,t} \omega)^2 - 2(k_{E,t} - m_{E,t} \omega^2)^2 \right)}{\left( (k_{E,t} - m_{E,t} \omega^2)^2 + (c_{E,t} \omega)^2 \right)^{\frac{5}{2}}} = 0 \quad (8)$$

Denklem (8) in sağlanabilmesi için

$$\left( (c_{E,t} \omega)^2 - 2(k_{E,t} - m_{E,t} \omega^2)^2 \right) = 0 \text{ olmalıdır.} \quad (9)$$

Denklem (9) düzenlendiğinde denklem (10) elde edilir:

$$k_{E,t} - m_{E,t} \omega^2 = \pm \frac{\sqrt{2}}{2} c_{E,t} \omega \Rightarrow m_{E,t} \omega^2 \pm \frac{\sqrt{2}}{2} c_{E,t} \omega - k_{E,t} = 0 \quad (10)$$

Denklem (10) için 4 farklı tahrik frekansı (denklem kökü) bulunabilir:

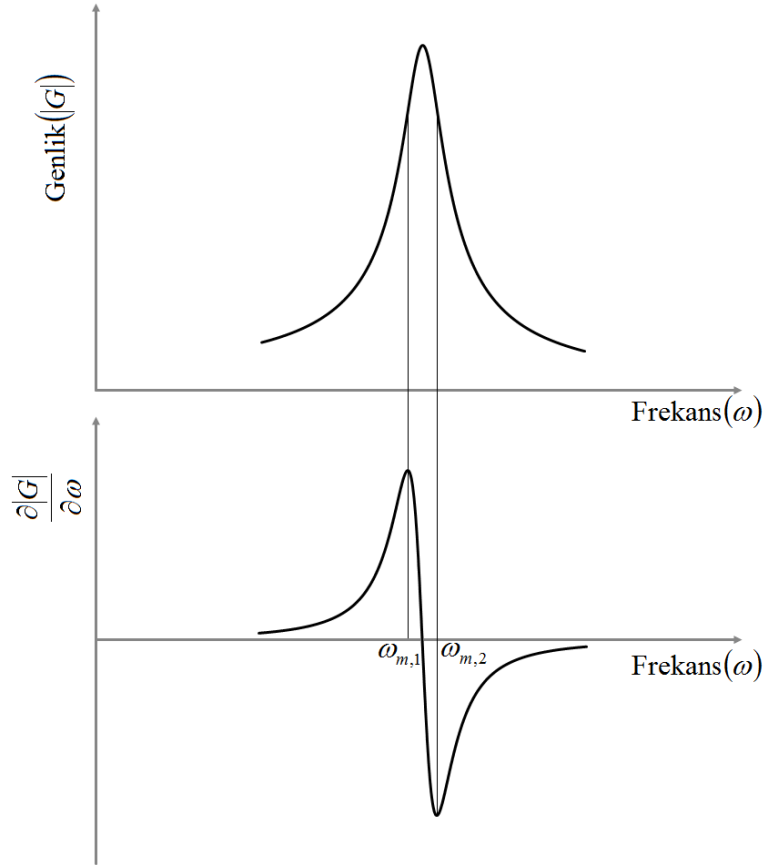
$$\omega = \mp \sqrt{\frac{c_{E,t}^2}{8m_{E,t}^2}} \pm \sqrt{\frac{k_{E,t}}{m_{E,t}} + \frac{c_{E,t}^2}{8m_{E,t}^2}} \quad (11)$$

Bulunan pozitif frekans değerleri olan ve orantı katsayısının en yüksek ve en düşük olduğu tahrik frekansları sırasıyla Denklem (12)'deki ve Denklem (13)'teki gibidir.

$$\omega_{m,1} = \sqrt{\frac{k_{E,t}}{m_{E,t}} + \frac{c_{E,t}^2}{8m_{E,t}^2}} - \sqrt{\frac{c_{E,t}^2}{8m_{E,t}^2}} \quad (12)$$

$$\omega_{m,2} = \sqrt{\frac{k_{E,t}}{m_{E,t}} + \frac{c_{E,t}^2}{8m_{E,t}^2}} + \sqrt{\frac{c_{E,t}^2}{8m_{E,t}^2}} \quad (13)$$

Şekil 5'te ÇBD yapısının genliği ve bu genliğin tahrik frekansına göre türevinin frekansa bağlı grafikleri görülebilir. Türevin maksimum ve minimum olduğu frekanslar ( $\omega_{m,1}$  ve  $\omega_{m,2}$ ) orantı katsayısının büyüklüğünün en fazla olduğu frekanslardır. Bu çalışmada da  $\omega_{m,1}$  civarında sürülen bir ÇBD ile yapılan manyetik alan ölçümleri sunulmaktadır.



**Şekil 5:**

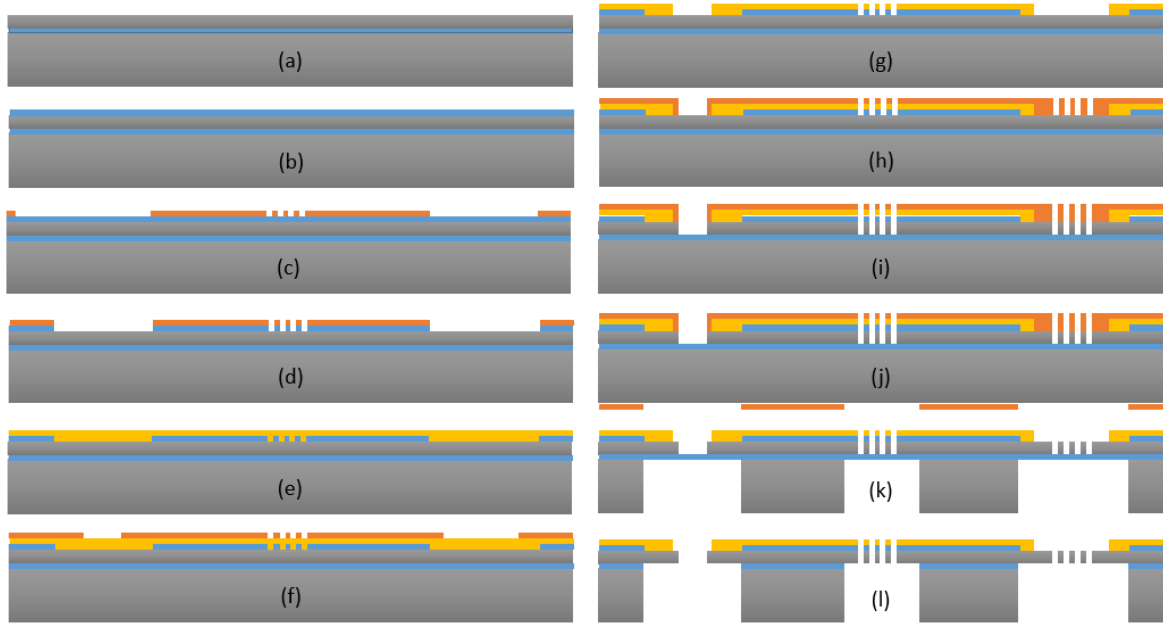
*ÇBD yapısının genliği ve bu genliğin tahrik frekansına göre türevi. Türevin maksimum ve minimum olduğu frekanslar ( $\omega_{m,1}$  ve  $\omega_{m,2}$ ) oranı katsayısının büyüklüğünün en fazla olduğu frekanslardır.*

### 3. MANYETOMETRELERİN ÜRETİMİ VE TESTLERİ

#### 3.1. Manyetometrelerin Üretimi

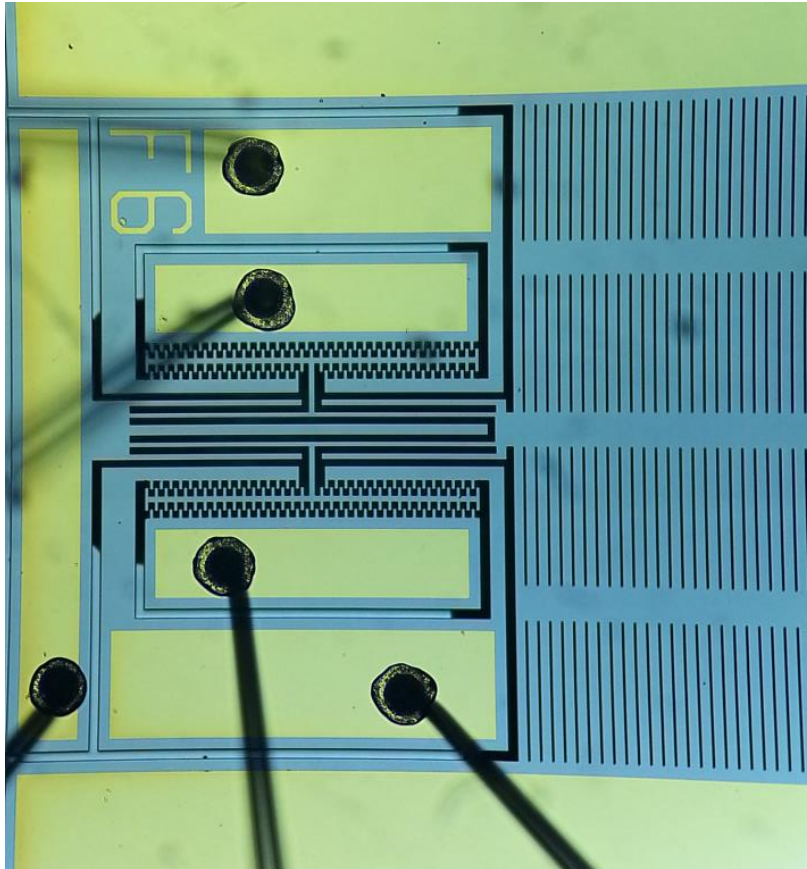
Bu çalışmada tasarlanan manyetometre yapıları uyarlanmış bir "Yalıtkan Üzeri Silisyum" tekniği ile üretilmişlerdir. Şekil 6'da manyetometrelerin üretim adımları gösterilmektedir. Temizlenen Yalıtkan Üzeri Silisyum (SOI) diskler (a) 0.7  $\mu\text{m}$  PECVD SiO<sub>2</sub> kaplandıktan (b) sonra bu oksit tabakasının işlenmesi için fotorezist litografisi (c) yapılır. RIE sistemi ile SiO<sub>2</sub> desenin işlenmesinin (d) ardından saçtırma yöntemi ile Cr/Au kaplanması (e) gerçekleştirilir. Sonrasında metal maskesi ile yapılan litografi (f) ile aşındırılacak metal alanlar belirlenerek ıslak aşındırma ile metal deseni işlenir (g). Bu adımlar sonucunda tel bağlamada kullanılacak altın yüzeyler oluşturulmuş olur.

Silisyumun işlenmesine geçildiğinde mikro yapıyı tanımlayan maske ile silisyum diskin litografisi yapılır (h). Derin Reaktif İyon Aşındırması (DRIE) sistemi ile mikro yapı desenin işlendikten sonra (i) diskin arka yüzünün litografisi (j) başka bir maske ile yapılır. Bu adımda ön yüzdeki yapıların korunabilmesi için SOI disk ek bir cam diske tutturulmaktadır. DRIE ile arka yüzün işlenmesinin (k) ardından RIE ile gömülü SiO<sub>2</sub> tabakası kaldırılır (l) ve yongalar kesilerek testlere hazır hale getirilir. Şekil 7'de ve tel bağlantıları tamamlanan manyetometre yapısının mikroskop görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 6:**

*Manyetometrelerin üretim akışı. Mavi bölgeler SiO<sub>2</sub>, gri bölgeler Si, kırmızı bölgeler fotorezist ve sarı bölgeler de altın katmanlarını göstermektedir.*



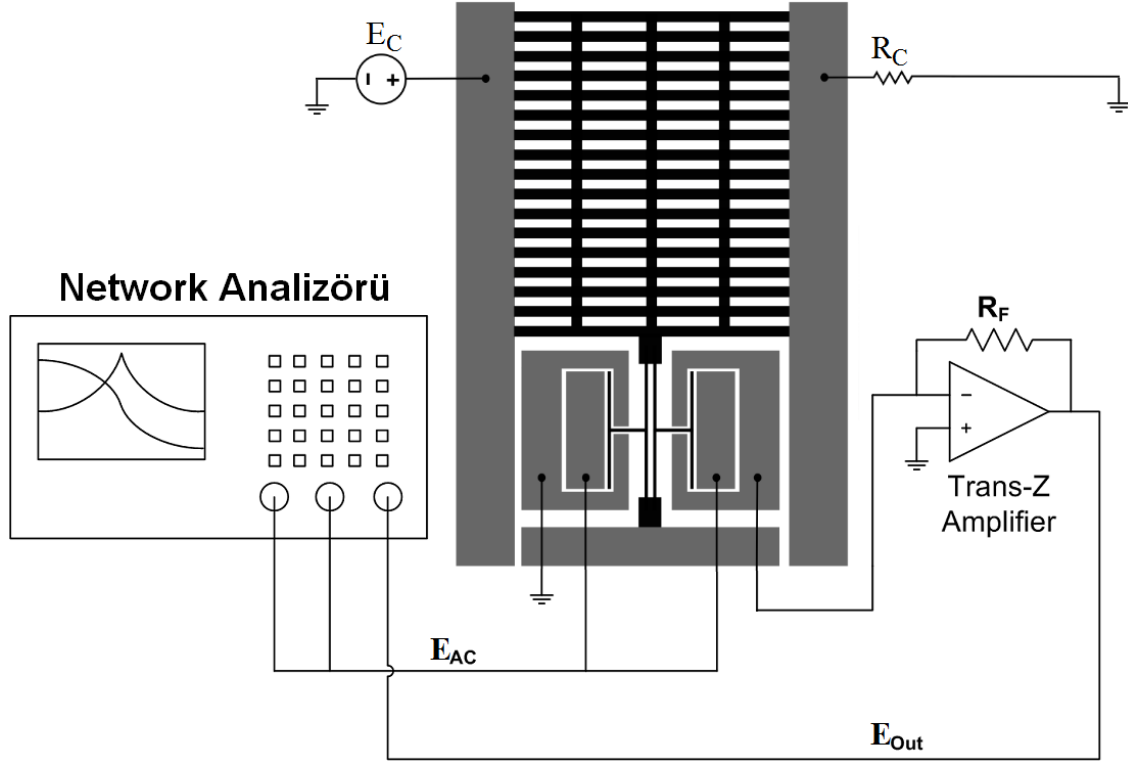
**Şekil 7:**

*Üretimi ve tel bağlantıları tamamlanan manyetometre yapısının mikroskop görüntüsü.*

### 3.2. Manyetometrelerin Testleri

#### 3.2.1. ÇBD Yapısının Frekans Tepkisi

Şekil 8'de test edilen manyetometrenin bağlantı şeması görülebilir. Şemada da görülebileceği gibi tahrik gerilimi ÇBD yapısının her iki elektroduna da verilirken algılama tek taraflı yapılmıştır. Bunun amacı analitik model ile karşılaştırmanın daha sağlıklı yapılabilmesidir.



**Şekil 8:**

*Test edilen manyetometrenin bağlantı şeması*

Elektrostatik tahrik kuvveti ( $F_t$ ) ile normalize edilen titreşim genliğinin ( $G$ ) etkin yay sabiti, etkin kütle ve etkin sönümlenme katsayısı ile olan ilişkisi Denklem (5)'te verilmişti. Op-amp çıkış voltajının ( $e_{out}$ ) titreşen elektrotların hızı ( $V$ ) ile olan ilişkisi Denklem (14)'te verilmiştir:

$$e_{out} = -R_{amp} \frac{\partial C}{\partial x} E_{DC} \dot{x} \Rightarrow \left| \frac{E_{out}}{V} \right| = R_{amp} \frac{\partial C}{\partial x} E_C \quad (14)$$

Denklem (14)'teki kapasitansın deplasmana göre değişimi tarak yapılı elektrotlar için Denklem (15)'teki gibidir. Denklemdeki 2 çarpanı her bir tarak dışının iki yüzünün de kapasitans oluşturması nedeniyle,  $n/2$  ise elektrodun yalnızca bir tarafındaki tarakların algılama için kullanılması nedeniyle. Elektrodun diğer tarafı tahrik için kullanılmaktadır.

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\epsilon_0 2 \frac{n}{2} h}{g} \quad (15)$$

Elektrot hız genliği de Denklem (16)'te verilmiştir:

$$\left| \frac{X}{F_t} \right| = |G| \Rightarrow \left| \frac{V}{F_t} \right| = \omega |G| \quad (16)$$

Denklem (15) ve (16) Denklem (14)'te yerine konduğunda Denklem (17)'ye ulaşılır.

$$\left| \frac{E_{out}}{F_t} \right| = \omega |G| R_{amp} \frac{\varepsilon_0 2 \frac{n}{2} h}{g} E_C \quad (17)$$

Elektrostatik tahrik için kullanılan diğer yüzde oluşan kuvvetin polarizasyon ( $E_C$ ) ve sürüş ( $E_{AC}$ ) gerilimleriyle olan ilişkisi de Denklem (18)'de verilmiştir:

$$F_t = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial x} E_C E_{AC} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 2 \frac{n}{2} h}{g} E_C E_{AC} \quad (18)$$

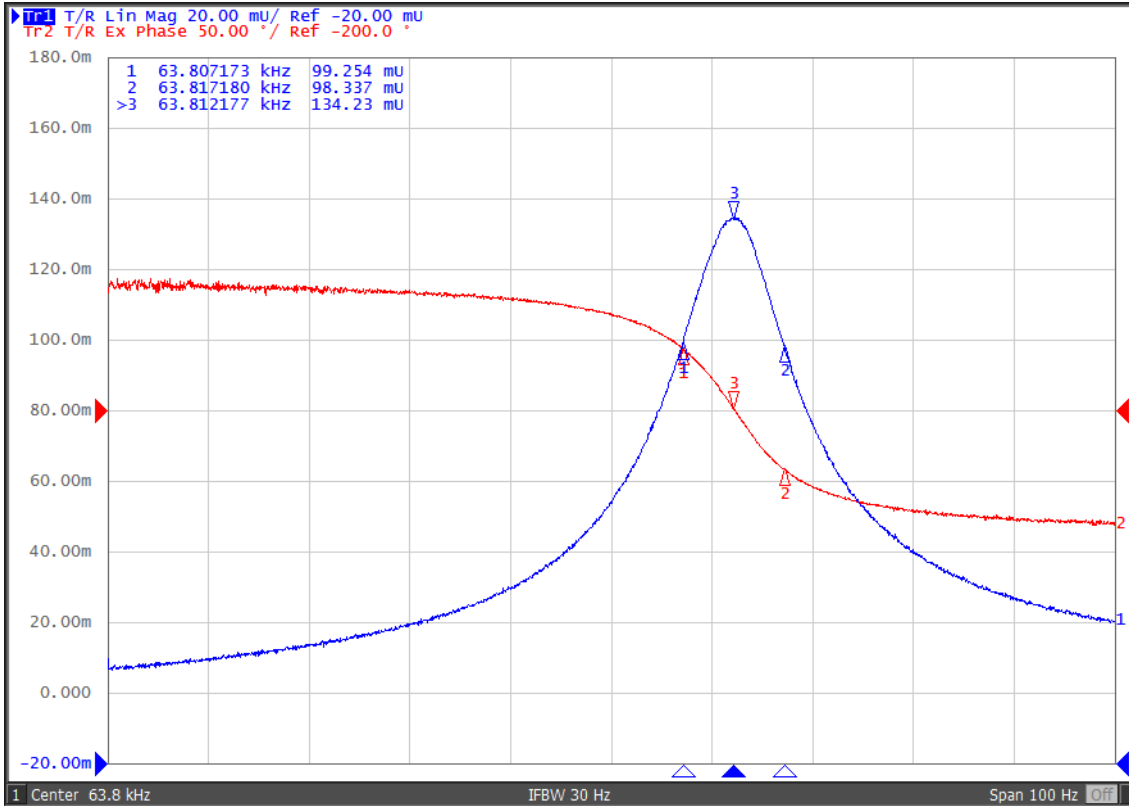
Denklem (18) Denklem (17)'de yerine konduğunda ÇBD yapısının elektromekanik genliği olan Denklem (19)'a ulaşılır:

$$|G_{EM}| = \left| \frac{E_{out}}{E_{AC}} \right| = \omega \underbrace{\frac{R_{amp}}{2} \left( \frac{\varepsilon_0 n h}{g} E_C \right)^2}_{\text{Kapasitif Kazanç}} \underbrace{|G|}_{\text{Mekanik Kazanç}} \quad (19)$$

Üretimi yapılan manyetometrenin elektromekanik genliğin bir ağ analizörü ile ölçümü yapılmış ve Denklem (18) ile karşılaştırılmıştır. 0.2 mTorr vakum altında test edilen ÇBD yapısının elektromekanik genliğinin frekansa bağlı doğrusal grafiği Şekil 9'da verilmiştir.

Tablo 1'de sunulan değişkenler Denklem (19)'a yerleştirilip Şekil 9'daki frekans tepkisi ile karşılaştırıldığında yapının kalite faktörünün ( $Q$ ) 5950, sönümlenme katsayısının da  $7,045 \cdot 10^{-8}$  Ns/m olduğu anlaşılmıştır. Test sonucunda ÇBD'nin tınlaşım frekansının 63812,1 Hz seviyesine düştüğü görülmektedir. Üretimde kullanılan Derin Reaktif İyon Aşındırması (DRIE) adımının uzun ve ince yapılarda (ÇBD yapısının kirişleri gibi) fazla yenim sonucu incelmeye neden olduğu bilindiğinden üretim sırasında tasarlanan maskedeki kiriş enindeki azalma hesaplanabilmektedir. Şekil 9'daki frekans tepkisi ve Tablo 1'de sunulan değişkenler bir araya getirildiğinde, üretilen ve test edilen yapının etkin yay sabitinin ( $k_{E,t}$ ) 168,078 N/m, etkin kütlelerinin de ( $m_{E,t}$ )  $1,05 \cdot 10^{-8}$  kg olduğu hesaplanmıştır. Bunun sonucunda kirişlerde yaklaşık 291 nm'lik bir yenim olduğu bulunmuştur. Bu miktar DRIE adımı için normal kabul edilebilecek bir yenimdir.

Ek olarak,  $181,71 \cdot 10^{-3}$  olarak hesaplanan tınlaşım frekansındaki elektromekanik kazanç ise  $134,23 \cdot 10^{-3}$  olarak ölçülmüştür. Yapılan hesaplama göre 2  $\mu$ m olarak tasarlanan tarak parmakları arası boşluğun üretim sırasında 326 nm arttığı, yani parmak yapılarının her iki taraftan da 163 nm incelendiği anlaşılmaktadır. Parmak boyu ve 2  $\mu$ m boşluk göz önüne alındığında, oluşan yenim DRIE işlemi için tipiktir.



Şekil 9:

Üretilen ÇBD yapısının elektromekanik genliğinin (mavi) ve fazının (kırmızı) frekans tepkisi.

### 2.1.1. Manyetik Alan Testleri

Yapının manyetik alana tepki verebilmesi için ızgara yapısından bir miktar akım geçirilmesi gerekmektedir. Bu tasarımda birbirlerine sonlarından ve ortalarından tutturulmuş çok sayıda kırıştan oluşan ızgara yapısı kullanılmıştır. Manyetik alanın varlığında kırışlerde oluşan Lorentz kuvvetinin yarısı ızgarayı ortasından destekleyen ÇBD yapısına, yarısı da ızgarayı kenarlarından destekleyen çapalara uygulanmış olur. Çok sayıda ve esnek olan kırışler birleştirilerek hem oluşacak elektriksel direnç azaltılmış hem de geçecek akım nedeniyle ısınan yapının iletim yoluyla soğuyabilmesi sağlanmıştır. Uygulanan  $E_c$  gerilimi ile oluşacak akımın kontrol edilebilmesi için, ızgaraya seri bağlanan kontrol direnci olan  $R_c$  kullanılmıştır. Böylece herhangi olası bir kısa devrede, geçen akımın sınırlandırılması sağlanmıştır.

Lorentz kuvveti nedeniyle ÇBD yapısına binen yüklenme Denklem (20)'de verilmiştir. Iızgara yapısındaki kırışlerin sayısının artırarak her bir kırışin enini azaltmak, yük dağılımının yarı yarıya olmasını sağlamak ve ısıl tepkiyi bastırmaktadır. ÇBD üzerinde oluşan kuvvet dikkate alındığında kırışlerin sayısından ziyade geçen toplam akım ( $i$ ) ve kırış uzunluğu ( $l$ ) belirleyicidir. Tasarımda kırış uzunluğu  $l=1\text{mm}$  olarak belirlenmiştir.

$$F = \frac{iBl}{2} \quad (20)$$

Denklem (5)'te verilen genlik denkleminin herhangi bir tahrik frekansında, eksensel yük yaratan bir manyetik alana göre türevi Denklem (21)'de görülebilir. Denklem (21), Denklem

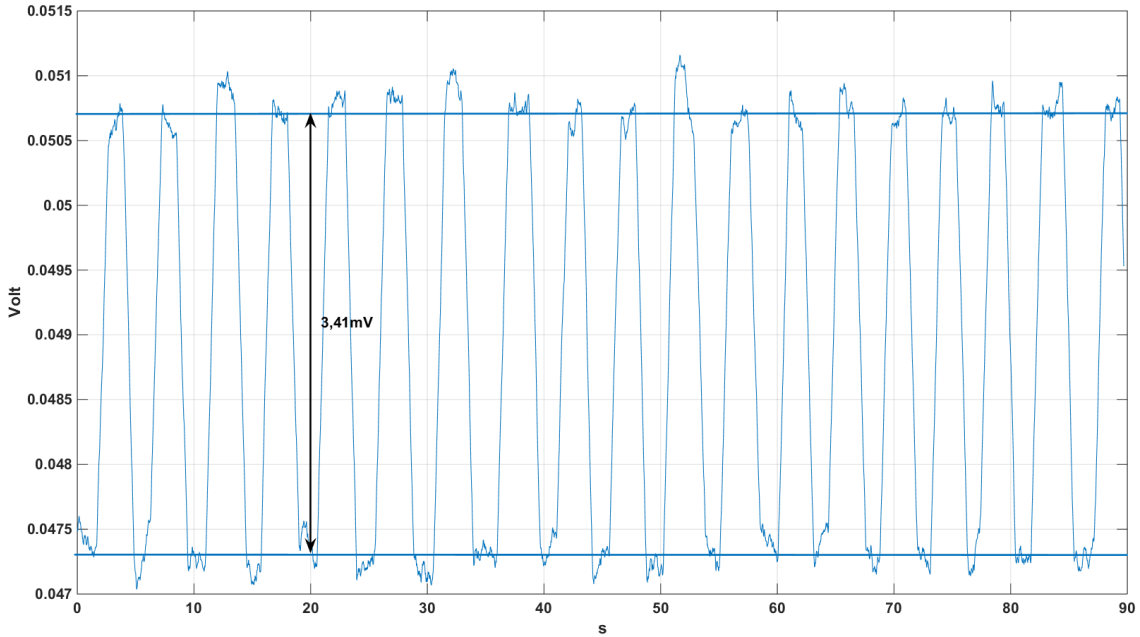
(5)'in eksensel yüke göre olan değişiminin Denklem (7) ve (19) kullanılarak manyetik alana göre olan değişimine çevrilmiş halidir.

$$\frac{\partial}{\partial B}|G| = \left(\frac{il}{2}\right) \frac{-2.4}{L_t} \left[ (k_{E,t} - m_{E,t}\omega^2)^2 + (c_{E,t}\omega)^2 \right]^{3/2} (k_{E,t} - m_{E,t}\omega^2) \quad (21)$$

Denklem (19)'da verildiği üzere, belirli bir tahrik genliğinde ( $E_{AC}$ ) ve frekansında ( $\omega$ ) sürülen manyetometre yapısının çıkışının genliğinin manyetik alana olan hassasiyeti de Denklem (22) de verilmiştir.

$$\frac{\partial |E_{out}|}{\partial B} = E_{AC} \omega \underbrace{\frac{R_{amp}}{2} \left( \frac{\epsilon_0 n h}{g} E_C \right)^2}_{\text{Kapasitif Kazanç}} \underbrace{\left( \frac{il}{2} \right)}_{\text{Manyetik Kazanç}} \underbrace{\frac{-2.4}{L_t} \frac{(k_{E,t} - m_{E,t}\omega^2)}{\left[ (k_{E,t} - m_{E,t}\omega^2)^2 + (c_{E,t}\omega)^2 \right]^{3/2}}}_{\text{Mekanik Kazanç}} \quad (22)$$

Yapının manyetik alan testlerindeki bağlantılar Şekil 8'de verilen şemadaki gibidir. Yalnızca frekans tepkisi yerine sabit frekanslı bir tahrik uygulanarak op-amp'ın çıkışındaki sinyalin genliği 20 dB kazanç eklenerek ölçülmüştür. Denklem (12) ve (13) kullanılarak bulunan maksimum hassasiyet için gereken tahrik frekansları 63808,3 Hz ve 63815,9 Hz'dir. Bu testte de frekansı 63808,3 Hz ve genliği 70 mV olan sinüzoidal bir elektrostatik tahrik uygulanmıştır. Izgara akım da 100 mA olacak şekilde  $R_c$  direnci ayarlanmıştır. 0.2 mTorr vakum altında ve bir Maxwell Sargısı yardımı ile 30 mT büyüklüğündeki manyetik alan yaklaşık 0,2 Hz'lik bir kare modülasyonla yapıya uygulanmıştır. Şekil 10'da çıkış sinyalinin genliğinin kare dalga şeklinde uygulanan manyetik alana tepkisi görülebilir

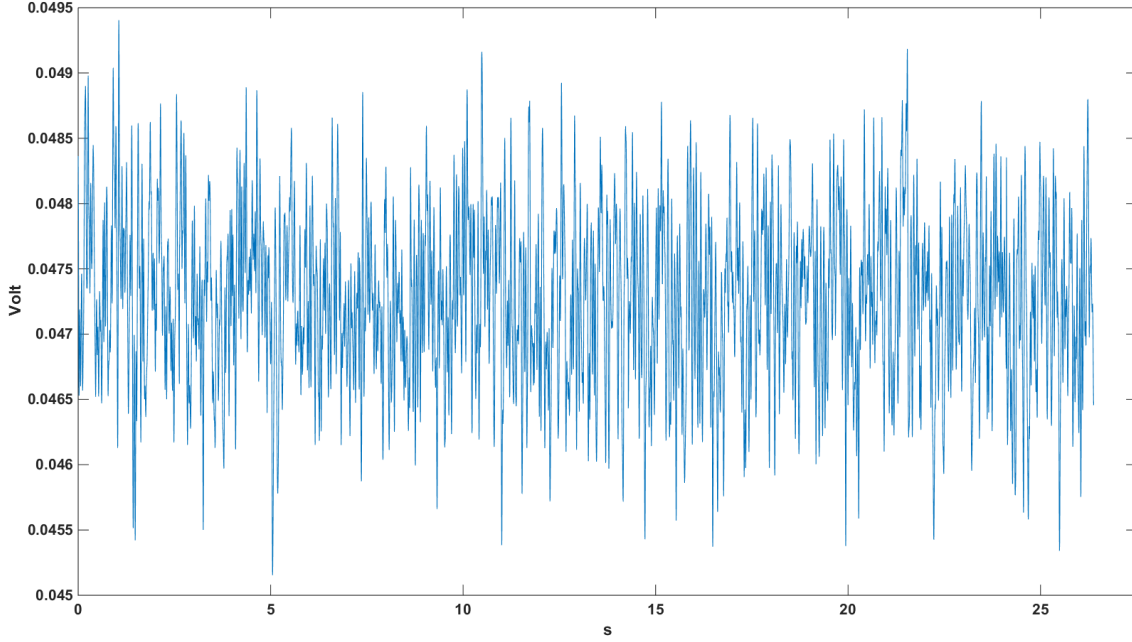


**Şekil 10:**

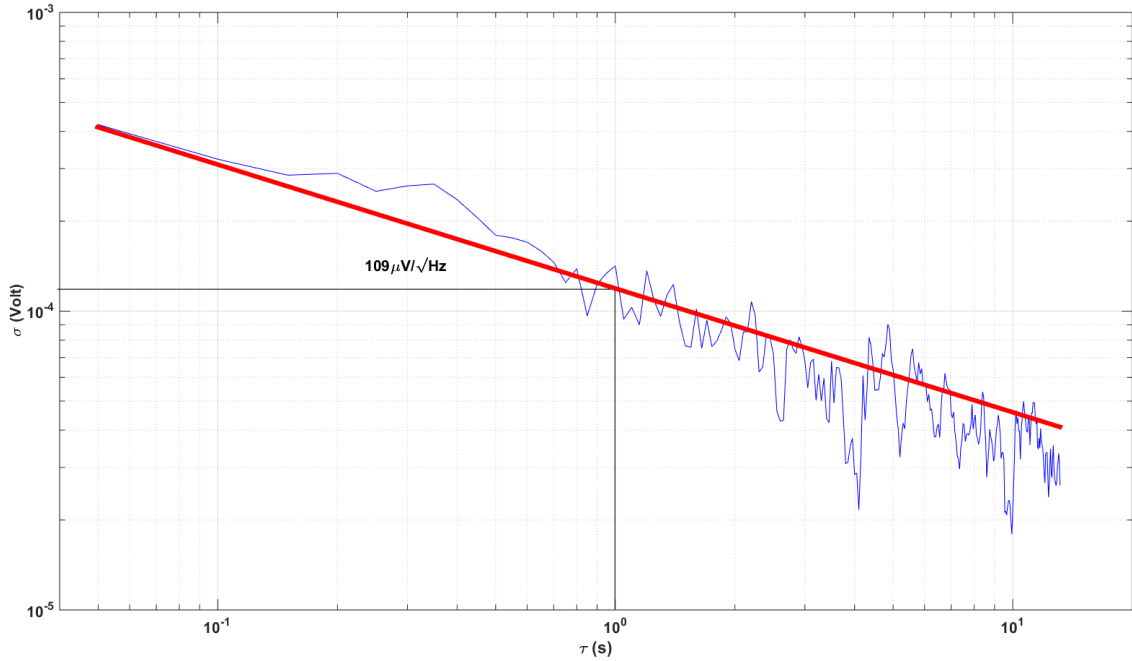
*Çıkış sinyalinin genliğinin kare dalga şeklinde uygulanan manyetik alana tepkisi.*

Şekil 10'da görüleceği üzere algılayıcı düzlemine dik olan manyetik alandaki 30 mT değişim 3,41 mV'luk bir çıkış sinyali oluşturmaktadır. Buradan orantı katsayısının 113 mV/T olduğu çıkarılmaktadır. Şekil 11'de ise manyetik alanın yokluğunda alınan çıkış gürültüsü ve Şekil 12'de bu sinyalin Allan varyansı görülebilir. Şekil 11'den sabit hata kaymasının (offset)

47.58 mV mertebesinde olduğu görünmektedir. Allan varyans analizinden de manyetometrenin  $965 \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$  çıkış gürültüsüne sahip olduğu ölçülmüştür.



**Şekil 11:**  
*Manyetik alanın yokluğunda alınan çıkış gürültüsü*



**Şekil 11:**  
*Manyetik alanın yokluğunda alınan çıkış gürültüsünün Allan varyansı.*

### 3. SONUÇ

Bu çalışmada titreşim genliği ölçümü ile çalışan Lorentz kuvveti tabanlı ve algılayıcısı tınlayan MEMS yük hücresi olan bir manyetometre sunulmaktadır. Manyetometre, tarak elektrotlara sahip Çift Bağlı Diyapazon (ÇBD) bir tınlatici ile, uçlarından ve ortalarından



birbirlerine bağlanmış kirislerden oluşan bir ızgara yapısından oluşmaktadır. Izgara yapısı, üzerinden geçen akımla Lorentz kuvvetini oluştururken, elektriksel direncin ve yapının sıcaklığının yükselmesini engellemektedir. Maksimum hassasiyet için yapının genlik frekans tepkisinin eğiminin en büyük olduğu tahrik frekansı seçilmiştir. Manyetometre standart SOI (Yalıtkan-Üzeri-Silisyum) mikro-işleme teknikleri kullanılarak 35 µm yapısal kalınlıkla üretilmiştir. Yapılan frekans tepkisi testinde ÇBD yapısının tınlaşım frekansının 63812,1 Hz ve 0,2 mTorr'daki kalite faktörünün de 5950 olduğu belirlenmiştir. Testler yapıya dik olarak oluşturulan 30mT manyetik alan altında, 100 mA ızgara akımı ve 70 mV tahrik genliği ile yapılmıştır. Manyetometrenin orantı katsayısı 113.7 mV/T ve duyarlılığı 965 µT/Hz<sup>1/2</sup> olarak ölçülmüştür. Bu değerler literatürle karşılaştırıldığında düşük hassasiyetli kalmakla birlikte, genlik tabanlı titreşen MEMS algılayıcılarda üretim tekniğinin hassasiyeti ve vakum seviyesinin çok kritik olduğunu ortaya koymuştur. Kalite faktörünün artırılabilirliği (veya sönümleme katsayısı azaltılabilirliği) ölçüde hassasiyette iyileşme görülebilecektir. Kalite faktörünün artırılabilmesi için de üretim sonrası lazerle ince ayarlama amaçlı dağlamalar ve vakum seviyesinin yükseltilmesi gerekmektedir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma "114E108 No'lu Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Projesi" desteği ve "European COST Action TD1202" desteği ile gerçekleştirilmiştir.

## KAYNAKLAR

1. Azgin, K. ve Valdevit, L. (2013) The effects of tine coupling and geometrical imperfections on the response of DETF resonators, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 23, 125011-(1-12). DOI:10.1088/0960-1317/23/12/125011
2. Bahreyni, B. ve Shafai, C. (2005) A micromachined magnetometer with frequency modulation at the output, *IEEE Sensors 2005*, Irvine, 580-583. DOI: 10.1109/ICSENS.2005.1597765
3. Blom, F. R., Bouwstra, S., Fluitman, J. H. J. ve Elwenspoek, M. (1989) Resonating silicon beam force sensor, *Sensors and Actuators*, 17, 513-519. DOI:10.1016/0250-6874(89)80039-3
4. Brugger, S. ve Paul, O. (2008) Resonant magnetic microsensor with microT resolution, *IEEE 21st International Conference on MEMS*, Tucson, 944-947. DOI:10.1109/MEMSYS.2008.4443813
5. Chang, S. C., Putty, M. W., Hicks, D. B., Li, C. H. ve Howe, R. T. (1990) Resonant-bridge two-axis microaccelerometer, *Sensors and Actuators A: Physical*, 21, 342-345. DOI:10.1016/0924-4247(90)85068-F
6. Cheshmehdoost, A., Jones, B. E. ve O'Connor, B. (1991) Characteristics of a force transducer incorporating a mechanical DETF resonator, *Sensors and Actuators A: Physical*, 26, 307-312. DOI:10.1016/0924-4247(91)87009-R
7. DiLella, D., Whitman, L. J., Colton, R. J., Kenny, T. W., Kaiser, W. J., Vote, E. C., Podosek, J. A. ve Miller, L. M. (2000) A micromachined magnetic-field sensor based on an electron tunneling displacement transducer, *Sensors and Actuators A: Physical*, 86, 8-20. DOI:10.1016/S0924-4247(00)00303-4
8. Emmerich, H. ve Schofthaler, M. (2000) Magnetic field measurements with a novel surface micromachined magnetic-field sensor, *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 47, 972-977. DOI:10.1109/16.841228

9. Erdem, U. (1982) Force and weight measurement, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 15, 857-872.
10. Ettelt, D., Rey, P., Jourdan, G., Walther, A., Robert, P. and Delamare, J. (2013) 3D Magnetic Field Sensor Concept for Use in Inertial Measurement Units (IMUs), *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 23(2), 324-333. DOI:10.1109/JMEMS.2013.2273362
11. Eyre, B., Pister, K. S. J., ve Kaiser, W. (1998) Resonant mechanical magnetic sensor in standard CMOS, *Electron Device Letters, IEEE*, 19, 496-498. DOI:10.1109/55.735758
12. Herrera-May, A. L., Garcia-Ramirez, P. J., Aguilera-Cortes, L. A., Figueras, E., Martinez-Castillo, J., Manjarrez, E., Saucedo, A., Garcia-Gonzalez, L. ve Juarez-Aguirre, R. (2010) Mechanical design and characterization of a resonant magnetic field microsensor with linear response and high resolution, *Sensors and Actuators A: Physical*, 165, 399-409. DOI:10.1016/j.sna.2010.07.005
13. Howe, R. T., Boser, B. E. ve Pisano, A. P. (1996) Polysilicon integrated microsystems: technologies and applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, 56, 167-177. DOI:10.1016/0924-4247(96)01291-5
14. Jha, C. M., Salvia, J., Chandorkar, S. A., Melamud, R., Kuhl, E. ve Kenny, T. W. (2008) Acceleration insensitive encapsulated silicon microresonator, *Applied Physics Letters*, 93, 234103-(1-3). DOI:10.1063/1.3036536
15. Kadar, Z., Bossche, A., Sarro, P. M. ve Mollinger, J. R. (1998) Magnetic-field measurements using an integrated resonant magnetic-field sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, 70, 225-232. DOI:10.1016/S0924-4247(98)00143-5
16. Keplinger, F., Kvasnica, S., Jachimowicz, A., Kohl, F., Steurer, J. ve Hauser, H. (2004) Lorentz force based magnetic field sensor with optical readout, *Sensors and Actuators A: Physical*, 110, 112-118. DOI:10.1016/j.sna.2003.10.025
17. Kyyräinen, J., Saari-Lahti, J., Kattelus, H., Karkkainen, A., Meinander, T., Oja, A., Pekko, P., Seppä, H., Suhonen, M., Kuisma, H., Ruotsalainen, S. ve Tilli, M. (2008) A 3D micromechanical compass, *Sensors and Actuators A: Physical*, 142, 561-568. DOI:10.1016/j.sna.2007.08.025
18. Lee, J. E. Y., Bahreyni, B. ve Seshia, A. A. (2008) An axial strain modulated double-ended tuning fork electrometer, *Sensors and Actuators A: Physical*, 148, 395-400. DOI:10.1016/j.sna.2008.09.010
19. Mo, L., Rouf, V. T., Jaramillo, G. ve Horsley, D. A. (2013) MEMS Lorentz force magnetic sensor based on a balanced torsional resonator, *Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*, Barcelona, 66-69. DOI:10.1109/Transducers.2013.6626702
20. Myers, D. R., Cheng, K. B., Jamshidi, B., Azevedo, R. G., Senesky, D. G., Chen, L., Mehregany, M., Wijesundara, M. B. J. ve Pisano, A. P. (2009) Silicon carbide resonant tuning fork for microsensing applications in high-temperature and high G-shock environments, *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*, 8, 021116-(1-7). DOI:10.1117/1.3143192
21. Niarchos, D. (2003) Magnetic MEMS: key issues and some applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, 109, 166-173. DOI:10.1016/S0924-4247(03)00179-1

22. Pala, S., Çiçek, M. ve Azgın, K. (2016) A Lorentz force MEMS magnetometer, *2016 IEEE Sensors Conference*, Orlando, 1-3. DOI: 10.1109/ICSENS.2016.7808507
23. Paros, J. M. (1973) Precision Digital Pressure Transducer, *ISA Transactions*, 12, 173-179.
24. Rodriguez, B. J., Callahan, C., Kalinin S. V. and Proksch, R. (2007) Dual-frequency resonance-tracking atomic force microscopy, *Nanotechnology*, 18, 475504-(1-6). DOI:10.1088/0957-4484/18/47/475504
25. Roessig, T. A., Howe, R. T., Pisano, A. P. ve Smith, J. H. (1997) Surface-micromachined resonant accelerometer, *International Conference on Solid State Sensors and Actuators, TRANSDUCERS '97*, Chicago, 859-862. DOI:10.1109/SENSOR.1997.635237
26. Seshia, A. A., Howe, R. T. ve Montague, S. (2002) An integrated microelectromechanical resonant output gyroscope, *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Las Vegas, 722-726. DOI: 10.1109/MEMSYS.2002.984372
27. Tang, W. C., Nguyen T.-C. H. ve Howe, R. T. (1989) Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures, *Sensors and Actuators*, 20, 25-32. DOI:10.1109/MEMSYS.1989.77961
28. Tilmans, H. A. C., Elwenspoek, M. ve Fluitman, J. H. J. (1992) Micro resonant force gauges, *Sensors and Actuators A: Physical*, 30, 35-53. DOI:10.1016/0924-4247(92)80194-8
29. Torrents, A., Azgin, K., Godfrey, S. W., Topalli, E. S., Akin, T. ve Valdevit, L. (2010) MEMS resonant load cells for micro-mechanical test frames: feasibility study and optimal design, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20, 125004-(1-17). DOI:10.1088/0960-1317/20/12/125004
30. Ueda, T., Kohsaka, F. ve Ogita, E. (1985) Precision force transducers using mechanical resonators, *Measurement*, 3, 89-94. DOI:10.1016/0263-2241(85)90010-7
31. Van Mullem, C. J., Tilmans, H. A. C., Mouthaan, A. J. ve Fluitman, J. H. J. (1992) Electrical cross-talk in two-port resonators - the resonant silicon beam force sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, 31, 168-173. DOI:10.1016/0924-4247(92)80099-0
32. Wickenden, D. K., Champion, J. L., Osiander, R., Givens, R. B., Lamb, J. L., Miragliotta, J. A., Oursler, D. A. ve Kistenmacher, T. J. (2003) Micromachined polysilicon resonating xylophone bar magnetometer, *Acta Astronautica*, 52, 421-425. DOI:10.1016/S0094-5765(02)00183-2
33. Wojciechowski, K. E., Boser, B. E. ve Pisano, A. P. (2004) A MEMS resonant strain sensor operated in air, *17th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Maastricht, 841-845. DOI: 10.1109/MEMSYS.2004.1290718
34. Yang, H. H., Myung N. V., Yee, J., Park, D. Y., Yoo, B. Y., Schwartz, M., Nobe, K., ve Judy, J. W. (2002) Ferromagnetic micromechanical magnetometer, *Sensors and Actuators A: Physical*, 97 ve 98, 88-97. DOI:10.1016/S0924-4247(01)00809-3
35. Yee, J. K., Yang, H. H. ve Judy, J. W. (2002) Dynamic response and shock resistance of ferromagnetic micromechanical magnetometers, *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2002*, Las Vegas, 308-311. DOI: 10.1109/MEMSYS.2002.984264
36. Zulliger, H. R. (1983) Precise measurement of small forces, *Sensors and Actuators*, 4, 483-495. DOI:10.1016/0250-6874(83)85061-6

