

MEMS İvme Ölçerler için Analog Yapay Sinir Ağı Temelli Kontrolcü Tasarımı

Zehan KESİLMİŞ*¹ ORCID 0000-0002-5781-9450
Murat AKSOY² ORCID 0000-0002-6980-5902

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Adana

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 13.06.2022 Kabul tarihi: 23.09.2022

Atıf şekli/ How to cite: KESİLMİŞ, Z., AKSOY, M., (2022). MEMS İvme Ölçerler için Analog Yapay Sinir Ağı Temelli Kontrolcü Tasarımı. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(3), 663-672.

Öz

Bu çalışmada tek eksenli kapasitif MEMS ivme ölçer için yeni bir analog yapay sinir ağı temelli bir kontrolcü önerilmektedir. Bu kontrolcü giriş katmanında bir, gizli katmanda altı ve çıkış katmanında iki nöron olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kontrolcü, AMI C5N 0,6 µm CMOS üretim teknolojisi kullanılarak Electric serim editörü ile tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolcünün başarısı çeşitli bilgisayar benzetimleriyle PID kontrolcüyle karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları önerilen kontrolcünün tepki süresi, aşım ve ölçüm aralığı açısından PID kontrolcünden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Analog tüm devre, MEMS, Yapay sinir ağı

Analog Artificial Neural Network Based Controller Design for MEMS Accelerometers

Abstract

In this study, a new artificial neural network-based analog controller is proposed for the uniaxial capacitive MEMS accelerometer. This controller is designed with one neuron in the input layer, six neurons in the hidden layer, and two neurons in the output layer. This controller was designed with Electric layout editor using AMI C5N 0.6 µm CMOS fabrication technology. The success of the designed controller was compared with the PID controller with various computer simulations. The simulation results showed that the proposed controller was more successful than the PID controller in terms of response time, overshoot and measurement range.

Keywords: Analog integrated circuit, MEMS, Neural network

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Zehan KESİLMİŞ, zkesilmis@atu.edu.tr

1. GİRİŞ

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ivme ölçerler otomotiv, tıp ve tüketici elektroniği başta olmak üzere geniş bir ticari pazara sahiptirler. Bu ticari başarının ana nedenleri: MEMS teknolojisinin piezo ve optik gibi algılama yöntemlerine göre az yer kaplaması, daha az güç tüketmesi ve CMOS yapılarla aynı yonga üzerinde üretilebilmesidir. Literatürdeki MEMS ivme ölçerler kontrolcü çeşidi, algılama yöntemi ve elektronik arayüz teknolojilerine göre sınıflandırılabilirler.

MEMS ivme ölçerler kontrol sistemine göre açık ve kapalı çevrim olarak iki ana başlıkta incelenebilir. Oldukça sade bir tasarıma sahip olan açık çevrim ivme ölçerler düşük hassasiyetli ve düşük maliyetli uygulamalarda tercih edilmektedirler. Bu sistemlerde harici ivmelenmeye maruz kalan sismik kütlelerin yer değiştirmesi ölçülerek çıkış işareti olarak kullanılmaktadır. Açık çevrim sistemler düşük maliyetleri ile öne çıksalara da düşük hassasiyet, kısa ölçüm aralığı ve dar bant genişliği gibi dezavantajları bulunmaktadır [1].

Kapalı çevrim ivme ölçerlerde harici ivmelenme altındaki sismik kütlelerin yer değiştirmesi, kontrolcü tarafından oluşturulan karşı bir elektrostatik kuvvetle kısıtlanır böylece yay ve sönümleme kaynaklı ikincil etkiler azaltılır. Bu yaklaşım MEMS ivme ölçerinin ölçüm aralığının ve bant genişliğinin artmasını sağlamaktadır [2].

Literatürde MEMS ivme ölçerler için sigma delta modülatör ($\Sigma\Delta$), kayan kipli kontrolcü (sliding mode controller), PID (Proportional Integral Derivative) gibi çeşitli kapalı çevrim kontrolcüler önerilmiştir [3]. Bu kontrolcülerde sismik kütleleri merkezde tutmak için geri besleme elektrotlarına uyarma işareti uygulanır. Bu sistemlerde uyarma işareti analog veya sayısal formda olabilir. Sayısal geri besleme işaretine sahip ivme ölçerler geri besleme hattında $\Sigma\Delta$ kullanılmaktadır. Bu yöntemin sayısal çıkış vermek gibi avantajı olmasına rağmen çözünürlüğün artmasıyla beraber

çevrim süresinin artması ve bant genişliğinin daralması gibi dezavantajları vardır. Yüksek doğruluk ve yüksek frekans cevabına ihtiyaç duyulan uygulamalarda analog kontrolcüler başarılı birer alternatif olmaktadır [4].

Kapalı çevrim ivme ölçerlerde tasarım ve uygulama kolaylığından ötürü PID kontrolcüler sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun yanında PID kontrolcü sismik kütlelerin yer değiştirmesini sınırlamak yerine denge durumunda tutmaya çalışmaktadır. Bu durum da ivme ölçerinin ölçüm hassasiyetini ve bant genişliğini düşürmektedir [5].

Piyasada, ST Microelectronics (LIS3LV02DL) [6], Analog Devices (ADXL103) [7], NXP (MMA685X) [8] ve MEMSIC (MXD6235M) [9] gibi firmaların ürettiği çeşitli sayısal ivme ölçerler bulunmaktadır. Fakat bu ivme ölçerler açık çevrim modda çalışmaktadırlar.

Bu çalışma kapsamında yapılan inceleme sonucunda MEMS ivme ölçerler için basit ve hızlı bir analog kontrolcüye ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın amacı kapasitif MEMS ivme ölçerler için etkili bir analog kapalı çevrim kontrolcü geliştirmektir. Bu çalışmanın araştırma sorusu ise şu şekildedir: “MEMS ivme ölçerlerin kapalı çevrim kontrolünde yapay sinir ağı kullanımı ivme ölçerinin başarısını ne ölçüde arttırmaktadır?”

Bu makale 5 bölümden oluşmaktadır. 2. bölümde MEMS ivme ölçerinin matematiksel modeli verilmiştir. 3. bölümde yapay sinir ağları ve kontrolcü tasarımına yer verilmiştir. 4. bölümde bilgisayar benzetim sonuçları verilmiştir. 5. bölümde ise sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. İVME ÖLÇERİN MATEMATİK MODELİ

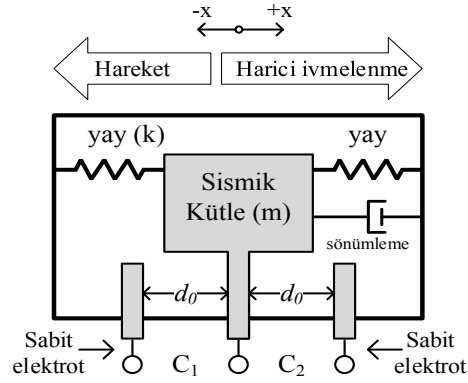
Kapasitif MEMS ivme ölçerler mekanik ve elektronik yapılardan oluşmaktadırlar. Mekanik yapıların amacı harici ivmelenmeyi kapasite değişimine çevirmektir. Elektronik yapıların

görevi ise bu kapasite değişimini ölçerek kontrol ve çıkış için gerekli olan işaretleri üretmektir.

Kapasitif MEMS ivme ölçerin mekanik bileşenleri şu şekilde sıralanabilir:

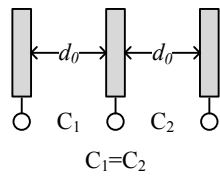
- Harici ivmelenme ile yer değiştirebilen bir sismik kütle,
- Yer değiştirmeye mekanik direnç gösteren polisilikon yaylar,
- Yer değişimini algulamak ve geri besleme kuvveti uygulamak için kapasitif yapılar.

Tek eksenli bir kapasitif MEMS ivme ölçerin mekanik bileşenlerini içeren blok şema Şekil 1'de verilmiştir. Harici ivmelenmeye (a_{ext}) maruz kalan sismik kütle (m) eylemsizlik kuvveti ($F=m.a$) ile ivmelenme eksenine zıt yönde hareket eder. Bu hareket ise yay sabiti bilinen polisilikon yaylar ile sınırlanır.

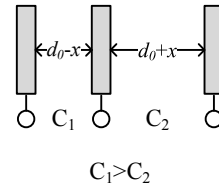


Şekil 1. MEMS ivme ölçerin blok şeması

İvme ölçerin $+x$ eksenindeki bir ivmelenmeye maruz kalması ve $-x$ ekseninde hareket etmesi durumunda kütle ile sabit elektrotlar arasındaki kapasitelerin (C_1 , C_2) açıklığı değişmektedir. Bu açıklık şekil 2a ve 2b'de gösterildiği gibi sıfır ivmelenme altında d_0 iken ivmelenme altında (d_0-x) ve (d_0+x) olarak değişmektedir.



a) Sismik kütle merkezdeyken elektrotların durumu



b) Sismik kütle ivmelenme yer değiştirmişken elektrotların durumu

Şekil 2. İvmelenme altında kapasitelerin durumu

Şekil 2'de görüldüğü üzere sismik kütle yer değiştirmesiyle C_1 sığası artarken C_2 sığası azalmıştır. C_1 ve C_2 sığalarını tanımlayan ifade Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$C_1 = \frac{\epsilon A}{d_0 - x}; C_2 = \frac{\epsilon A}{d_0 + x} \quad (1)$$

Eşitlik 1'de ϵ dielektrik sabiti, A kapasitenin yüzey alanını, d_0 sıfır ivmelenme durumunda elektrotlar arası mesafeyi, x ise sismik kütle yer değiştirmesini göstermektedir. Eşitlik 1'den de görüldüğü üzere C_1 ve C_2 sığalarının ölçülmesiyle yer değiştirme tespit edilebilmektedir. Yer değiştirme ile harici ivmelenme arasındaki ilişki ise tek serbestlik dereceli sistem (kütle, yay ve

sönümlenme) şeklinde tanımlanmış ve Eşitlik 2'de sunulmuştur.

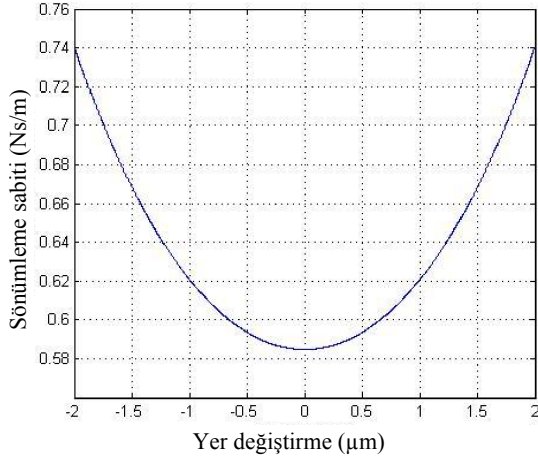
$$m a_{ext} = m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx \quad (2)$$

Eşitlik 2'de m sismik kütle, a_{ext} harici ivmelenmeyi, b sönümlenme etkisini, k yay sabitini x ise yer değiştirmeyi ifade etmektedir. Hareket halindeki sismik kütle hava molekülleri nedeniyle etkiyen sönümlenme kuvvetinin ifadesi Eşitlik 3'de sunulmuştur.

$$b(x) = \frac{1}{2} \mu A^2 \left(\frac{1}{(d_0 - x)^3} + \frac{1}{(d_0 + x)^3} \right) \quad (3)$$

Eşitlik 3'de μ havanın yoğunluğunu, A sismik kütlenin yüzey alanını, x yer değiştirmeyi, d_0 ise elektrotlar arası mesafeyi göstermektedir.

Sismik kütlenin yer değiştirmesi ile sönümleme etkisi arasındaki ilişki Şekil 3'de sunulmuştur.



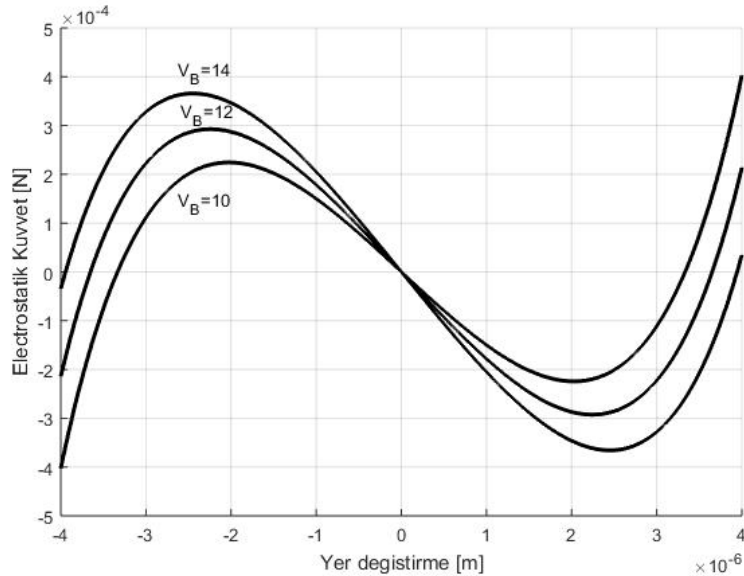
Şekil 3. Sönümleme/yer değiştirme grafiği

Şekilden de görüldüğü üzere doğrusal olmayan sönümleme etkisinin en aza indirilmesi için sismik kütlenin yer değiştirilmesinin sınırlandırılması bir

zorunluluktur. Bu amaçla açık çevrim ivme ölçerlerde mekanik durdurucular kullanılırken kapalı çevrim ivme ölçerlerde elektrostatik geribesleme kuvvetlerinden (F_e) faydalanılır. Bu kuvvet uygulanan geri besleme geriliminin (V_F) karesiyle doğru orantılı ve elektrotlar ile kütle arasındaki mesafenin karesiyle ters orantılıdır. Sismik kütleyle uygulanan toplam F_e eşitlik 4'de verilmiştir [10].

$$F_e = \frac{1}{2} N \epsilon l t \left[\frac{(V_B + V_F)^2}{(d_0 - x)^2} - \frac{(-V_B + V_F)^2}{(d_0 + x)^2} \right] \quad (4)$$

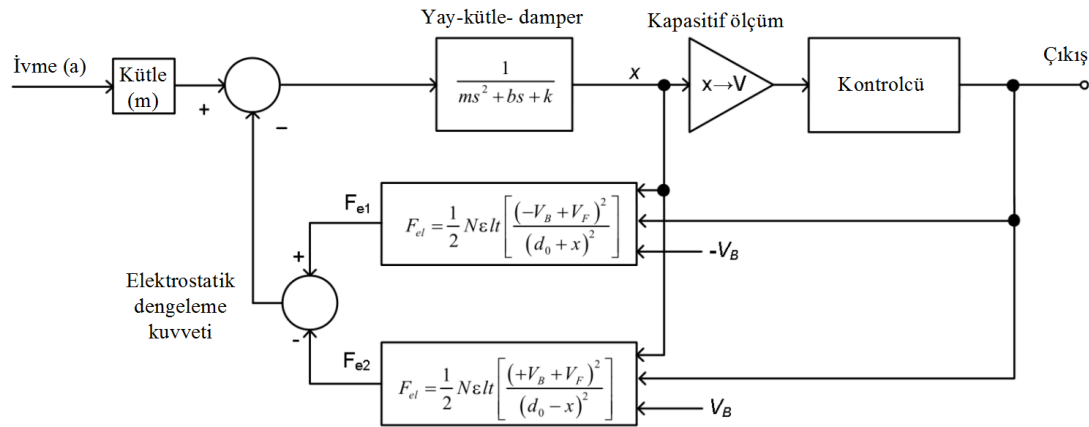
Eşitlik 4'de N uyarma işareti uygulan kapasite sayısını, ϵ yalıtkanlık sabitini, l çubuk boyunu, t ise polisilikon kalınlığını, x sismik kütlenin yer değiştirmesini göstermektedir. V_B ön kutuplama gerilimini V_F ise geri besleme gerilimini göstermektedir. Ön kutuplama gerilimi elektrostatik alanı doğrusal bölge içinde tutmak için kapasitif elektrotlara uygulanan bir gerilimdir. Eşitlik 4'de verilen elektrostatik kuvvetin ± 4 μm 'lik yer değiştirme için değişimi Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. F_e / yer değiştirme grafiği

Şekil 4’de görüldüğü üzere elektrostatik kuvvet sismik kütlelerin kısa mesafeli ($x < |1| \mu\text{m}$) hareketleri için doğrusal olarak kabul edilse de artan yer değiştirme ($x > |2| \mu\text{m}$) ile beraber hem yönü hem de şiddeti değişmektedir. Eğer sismik kütlelerin yer değiştirmesi sınırlanmaz ise bu kuvvet sismik kütleleri itmek yerine çekecek böylece

elektrotların birbirine çarpıp hasar görmesine neden olacaktır. Açık çevrim sistemlerde kütlelerin yer değiştirmesi mekanik sınırlayıcılarla kısıtlanmış olsa da bu eklenti ivme ölçerin bant genişliği ve ölçüm aralığını da sınırlamaktadır [11].



Şekil 5. Kapalı çevrim ivme ölçerin blok diagramı

Kapalı çevrim MEMS ivme ölçerin blok diagramı Şekil 5’de verilmiştir. Blok diagramının alt bileşenleri şu şekilde sıralanabilir: kapasitif ölçüm devresi, kontrolcü, elektrostatik geri besleme yapısı.

Kapasitif ölçüm yapıları OTA (Operational Transconductance Amplifier) veya OPAMP (Operational Amplifier) ile gerçekleştirilen şarj yükselteçleridir. Bu yapı sayesinde kapasite değişimi algılanıp gerilime çevrilir ve kontrolçüye girdi işareti olarak uygulanır. Kontrolcünün çıkışı ise ivme ile çıkış işareti arasındaki doğrusallığı sağlamak için kapasitif geri besleme elemanlarına uygulanır. Bu çalışma kapsamında tasarlanan yapay sinir ağı temelli kontrolcünün özellikleri ilerleyen bölümde sunulmuştur.

3. MATERYAL VE METOD

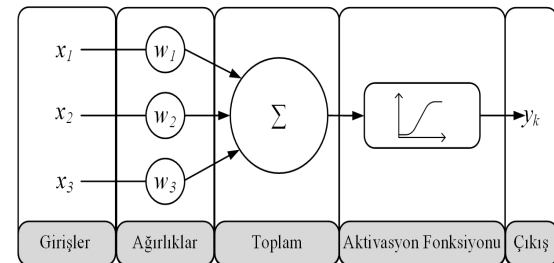
Bu çalışmada kapasitif MEMS ivme ölçer için analog yapay sinir ağı temelli bir kontrolcü tasarlanmış ve başarısı çeşitli bilgisayar benzetimleri ile incelenmiştir.

3.1. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA), örüntü tanıma, fonksiyon yaklaşımı ve kontrol gibi çok çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Yapay sinir ağının blok diagramı Şekil 6’da, matematiksel ifadesi ise Eşitlik 5’de verilmiştir.

$$y = \theta \sum_{j=1}^n w_j x_j \quad (5)$$

Eşitlik 5’de θ aktivasyon fonksiyonunu (AF), w ağırlıkları, x girişleri ve y ise çıkışı göstermektedir.



Şekil 6. YSA blok diagramı

Şekil 6'dan görüldüğü üzere YSA'nın girişleri (x_i) ilgili ağırlıklarla (w_i) çarpılmakta ve sonuçlar toplanmaktadır. İşlem sonucu ise aktivasyon fonksiyonuna tabi tutulmaktadır. Aktivasyon fonksiyonunun görevi YSA'nın girişleri ile çıkışı arasında doğrusal olmayan bir ilişki tesis edebilmektir. Bu fonksiyonların kullanımı ile YSA'lar fonksiyon yaklaşımı ve kontrol gibi doğrusal olmayan işlevler görebilmektedir.

3.2. Yapay Sinir Ağı Kontrolcü

Önerilen kontrolcünün temel görevi harici ivmelenme altında sismik kütleyi merkezde tutmaktır. Bu sayede yer değiştirme ile meydana gelen doğrusal olmayan ikincil etkilerden sakınmak mümkün olmaktadır. Bu operasyon sırasında sismik kütlelerin yer değiştirmesi gözlenir ve aksi yönde bir elektrostatik kuvvet oluşturmak için geri besleme elektrotlarına uyarma işareti (V_F) uygulanır. YSA kontrolcünün bu işlevi yerine getirmesi için eğitilmesi gerekir. Bu çalışmada sistemin sadeliğini korumak amacıyla yonga üzerinde öğrenme tercih edilmemiştir. Bunun yerine MATLAB ortamında yapılan eğitim sonucu elde edilen ağırlıklar kontrolcünün EPROM'una aktarılmaktadır. Eğitim veri seti yer değiştirme (x) ile elektrostatik kuvvet (F_e) arasındaki ilişkiden faydalanılarak türetilmiş ve $x \approx 0$ yapacak V_F işaretini sağlayacak şekilde üretilmiştir.

YSA'ların DSP (Digital Signal Processor) ve bilgisayar yazılımı ile gerçekleştirilen uygulamaları yüksek işlem gücü ihtiyaç duyarlar. Bunun yanında ortamdaki toplanan işaretlerin işlenmesi ve kontrol işaretlerinin uygulanabilmesi için sırasıyla ADC (Analog to Digital Converter) ve DAC (Digital to Analog Converter)'ye de ihtiyaç duyarlar.

Analog YSA kontrolcüler ADC ve DAC'ya ihtiyaç duymazlar. Aritmetik işlemlerin tamamı analog devre yapıları ile gerçekleştirilir. Analog YSA'larda nöron ağırlıkları kapasite veya yüzer geçitli MOSFET (FGMOS) EEPROM'larda saklanır. Çarpma işlemleri ise 4 bölgeli çarpma devreleri ile gerçekleştirilir. Aktivasyon fonksiyonları ise analog olarak OPAMP'lar ile gerçekleştirilir.

Önerilen kontrolcü AMI C5N 0,6 μ m teknoloji ve Electric serim editörü kullanılarak tasarlanmıştır. Electric yazılımı yardımıyla serim üzerinden SPICE benzetimleri yapılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde devredeki parazitik direnç ve kapasiteler de benzetime dahil edilip daha gerçekçi benzetim sonuçları elde edilmiştir.

Önerilen YSA kontrolcünün bileşenleri şu şekilde sıralanabilir:

- girişlerin ağırlıklarla çarpılması için 4 bölgeli çarpıcı,
- ağırlıkların saklanması için FGMOS hafıza elemanı ve
- nöron çıkışında bulunan aktivasyon (\tanh) fonksiyonu.

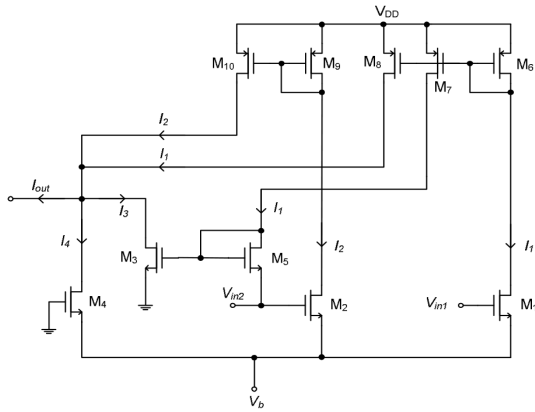
Önerilen kontrolcünün girişi sismik kütlelerin yer değiştirme işaretidir. Altı nöronlu bir gizli katmanı ve geri besleme oluşturma amacıyla iki adet çıkışı bulunmaktadır. Kontrolcünün giriş işareti kapasite ölçüm biriminden sağlandığı için gerilim şeklindedir. YSA'nın ağırlıkları ise gerilim olarak saklanmaktadır. Çarpıcının çıkışı ise akım şeklindedir. Nöron işlemleri sırasında ilgili nöronun girişi ilgili ağırlıklarla çarpılmakta ve tüm çarpımlar toplanmaktadır. Akım modlu analog çarpıcıların çıkışları tek bir düğümde birleştirilerek toplanmaktadır. Böylece toplama devresine gerek kalmamaktadır. Toplanan işaretler ise aktivasyon fonksiyonuna uygulanmakta ve buradan elde edilen işaret ise geri besleme elektrotlarına uygulanmaktadır. Analog işlem bloklarının özellikleri ilerleyen kısımda sunulmuştur.

3.2.1. Analog Çarpıcı

Analog çarpıcılar modülatör, değişken kesim frekanslı filtreler ve osilatörler başta olmak üzere çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Bu çalışma kapsamında dört bölgeli, gerilim girişli ve akım çıkışlı bir çarpıcı tasarımı kullanılmıştır. Nöron işlemleri sırasında giriş işaretleri ile ilgili ağırlıklar çarpılıp sonuç AF (Activation Function) birimine aktarılmaktadır. Hem ağırlıklar hem de yer değiştirme $[-1 \text{ V}, +1 \text{ V}]$ aralığına normalize edildiğinden çarpıcının 4 bölgeli olması bir zorunluluktur. İdeal bir çarpıcı eşitlik 6'daki gibi işlev görmektedir.

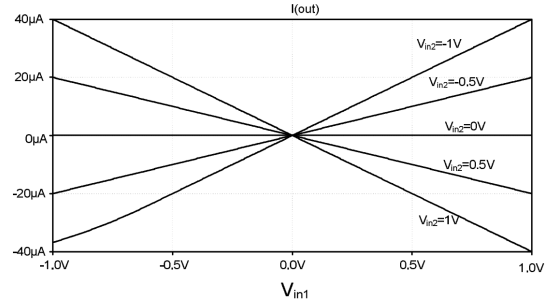
$$I_{out} = K_m V_{in1} V_{in2} \quad (6)$$

Eşitlik 6'da K_m çarpma kazancını V_{in1} ve V_{in2} ise giriş işaretlerini temsil etmektedir. Hollis ve Paulos tarafından önerilen ve bu çalışmada kullanılan çarpıcının devre şeması şekil 7'de verilmiştir [12].



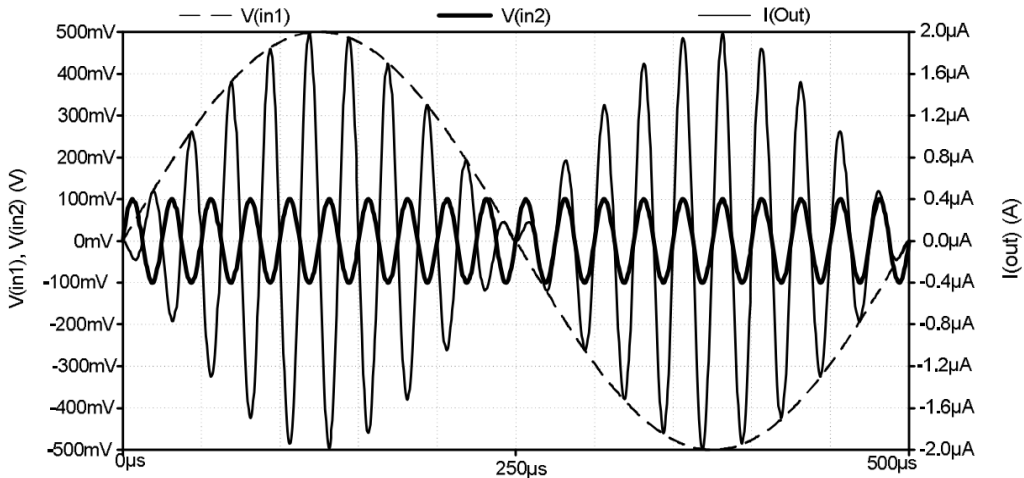
Şekil 7. 4 bölge analog çarpıcı devresi

4 bölge çarpıcının başarı incelemesi amacıyla SPICE ortamında $[-1 \text{ V}, +1 \text{ V}]$ aralığındaki V_{in1} ve V_{in2} giriş işaretleri uygulanmış ve sonuçlar Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Çarpıcının transfer fonksiyonu

Kullanılan çarpıcının dinamik başarı incelemesi amacıyla girişlerine sırasıyla 2 kHz ve 50 Hz frekansta, 500 mV ve 100 mV genlikte iki sinüs işareti uygulanarak modülatör olarak benzetim yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 9'da sunulmuştur.



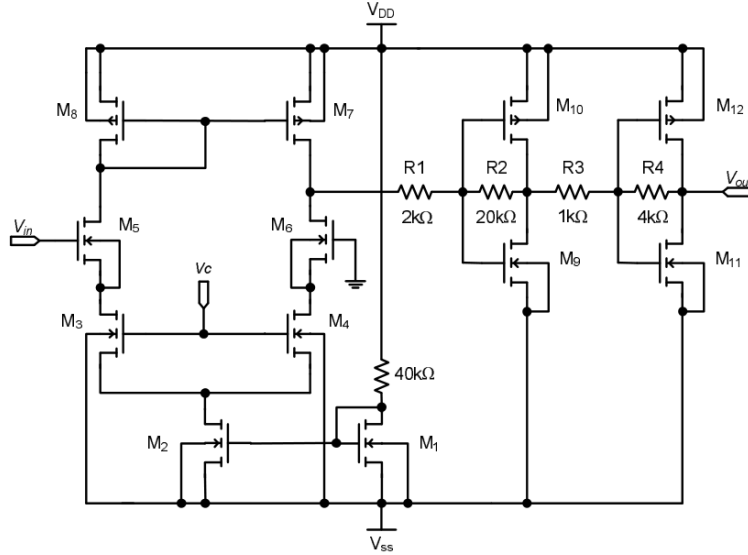
Şekil 9. Çarpıcının modülatör olarak kullanımı

Şekil 9'dan görüldüğü üzere çarpma bloğu düşük (50 Hz) ve yüksek (2 kHz) frekanslı iki sinüs işaretini üstün başarı ile çarpabilmektedir.

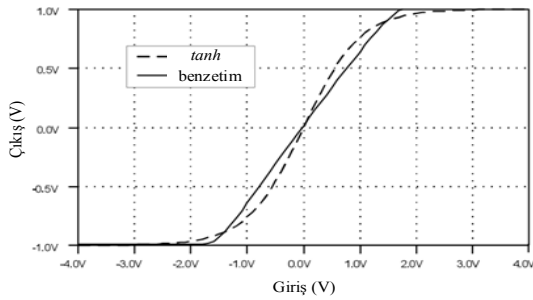
3.2.2. Aktivasyon Fonksiyonu (AF)

Aktivasyon fonksiyonları YSA'lar için önemli işlem bloklarından birisidir. AF'ler sigmoid,

tanjant hiperbolik (\tanh) veya doğrusal gibi sürekli türevlenebilir fonksiyonlardır. Bu çalışmada AF olarak \tanh fonksiyonu kullanılmıştır. Bu amaçla gerilim girişli ve gerilim çıkışlı bir AF devresi tasarlanmıştır. Fark yükseltici temelli bu yapının devre şeması ve transfer fonksiyonu sırasıyla Şekil 10 ve 11'de sunulmuştur.

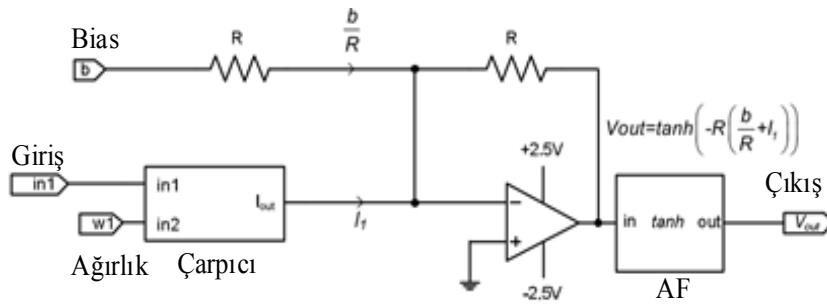


Şekil 10. Tanh aktivasyon fonksiyonu devresi



Şekil 11. Tasarlanan AF'nin tanh ile karşılaştırılması

Şekil 11'den görüldüğü üzere tasarlanan AF ile gerçek tanh fonksiyonu arasında farklılık bulunmaktadır. Bu durumun kontrolcünün başarısını etkilememesi için YSA eğitimi sırasında tanh yerine tasarlanan AF kullanılmıştır. Tasarlanan analog YSA'nın tek giriş ve tek çıkışlı nöron yapısı Şekil 12'de sunulmuştur.



Şekil 12. Tek giriş ve tek çıkışlı nöron yapısı

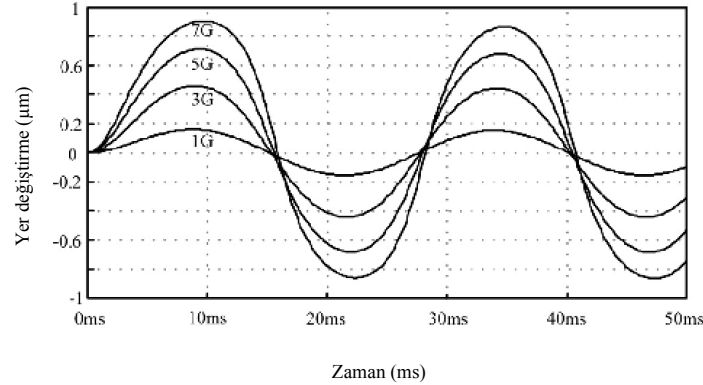
Şekilden görüldüğü üzere nöron yapısı çarpma toplama ve aktivasyon fonksiyonu yapılarından oluşmaktadır. Söz konusu nöron yapısının çıkışı Eşitlik 7'de verilmiştir.

$$V_{out} = \tanh\left(-R\left(\frac{b}{R} + in_1 \times w_1\right)\right) \quad (7)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

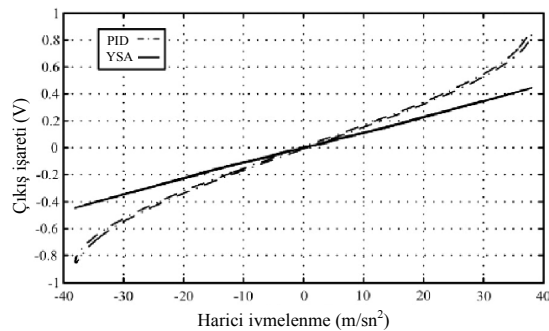
Bu bölümde, açık çevrim, kapalı çevrim (PID) ve önerilen kontrolcünün aynı MEMS ivme ölçer yapısı üzerindeki bilgisayar benzetimlerinin

sonuçları sunulmuştur. Açık çevrim ivme ölçerin ± 7 g genlik ve 40 Hz frekanslı sinüs formundaki ivmelenme altındaki yer değiştirme grafiği Şekil 13’de sunulmuştur.



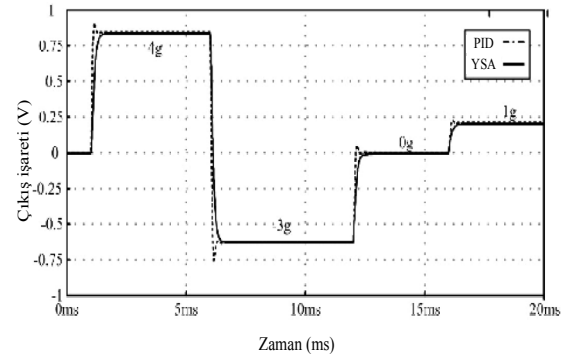
Şekil 13. Açık çevrim ivme ölçerin sinüs ivmelenme cevabı

Şekil 13’den de görüldüğü üzere açık çevrim ivme ölçerin doğrusal çalışma aralığı ± 3 g ile sınırlıdır. Bu durum ivme ölçerin çalışma aralığının artırılması için kapalı çevrim bir kontrolcü kullanılması gerektiğini göstermektedir. Bu amaçla bir analog PID kontrolcü tasarlanmış ve önerilen YSA kontrolcüyle ± 40 g ivmelenme altında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Tamamen analog yapıda tasarlanan YSA kontrolcünün çıkışı da PID kontrolcüde olduğu gibi analogtur. PID kontrolcünün parametreleri şu şekildedir: $K_p=-6$, $K_I=-0,6$, $K_D=0,2$ ve $V_B=12$ V. Önerilen YSA ve PID kontrolcülerin statik karakteristikleri Şekil 14’de sunulmuştur.



Şekil 14. PID ve YSA kontrolcülerin ± 40 g ivmelenme altındaki transfer karakteristikleri

Görüldüğü üzere YSA ve PID ivme ölçerlerin doğrusal çalışma aralıkları sırasıyla ± 10 g ve ± 38 g olmuştur. PID ve YSA ivme ölçerlere $+4$ g, -3 g genlikte ve 5 kHz frekansta kara dalga ivmelenmeler uygulanmış ve benzetim sonuçları Şekil 15’de verilmiştir.



Şekil 15. PID ve YSA kontrolcülerin basamak şeklindeki ivmelenmelere olan tepkisi

Bu çalışma kapsamında yapılan bilgisayar benzetim çalışmalarında tepki süresi, doğrusallık ve ölçüm aralığı gibi parametreler incelenmiş ve sonuçlar çizelge 1’de sunulmuştur. Bu incelemeler sonucunda önerilen kontrolcünün osilasyonsuz ve aşısız bir karaktere sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 1. Benzetim sonuçları

Kontrolcü	Aşım	Yükselme süresi	Yatışma süresi
PID	%6,8	0,10 ms	0,50 ms
Önerilen	0	0,20 ms	0,25 ms

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kapasitif MEMS ivme ölçerler için yapay sinir ağı temelli bir analog kontrolcü önerilmiştir. Önerilen yapay sinir ağı kontrolcü 1-6-2 yapıda ve AMI C5N 0,6 µm CMOS üretim teknolojisi kullanılarak tasarlanmıştır. Kontrolcünün girişi sismik kütlelerin yer değiştirme işareti çıkışları ise elektrostatik geri besleme işaretidir. Kontrolcünün amacı harici ivmelenme altında sismik kütleyi sabit tutarak sönümleme ve yay kaynaklı ikincil etkilerin bertaraf edilmesidir. Önerilen kontrolcünün başarı incelemesi amacıyla SPICE ortamında statik ve dinamik ivmelenme koşullarında çeşitli benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu benzetimlerde önerilen kontrolcü ile PID kontrolcü aynı şartlar altında sınanmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki önerilen yöntem tepki süresi, aşım ve ölçüm aralığı açısından PID kontrolcünden daha iyi performans göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

1. Grinberg, B., Feingold, A., Furman, L., Wolfson, R., 2016. High Precision Open-loop and Closed-loop MEMS Accelerometers with Wide Sensing range. IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium. 6-11 Nisan 2016, Georgia, ABD.
2. Borovic, B., Liu, A.Q., Popa, D., Cai, H., Lewis, F.L., 2005. Open-loop Versus Closed-loop Control of MEMS Devices: Choices and Issues, Journal of Micromechanics and Microengineering, 15(10), 1917-1926.
3. Mohammed, Z., Elfadel, I.A.M., Rasras, M., 2018. Monolithic Multi Degree of Freedom (MDoF) Capacitive MEMS Accelerometers, Micromachines, 9(11), 602.
4. Yin, T., Ye, Z., Huang, G., Wu, H., Yang, H., 2018. A Closed-loop Interface for Capacitive Micro-accelerometers with Pulse-width-

- modulation Force Feedback, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 94(2), 195-204.
5. Liu, S.H., 1994. CMOS Four-quadrant Multiplier Using Bias Feedback Techniques, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 29(6), 750-752.
6. Mouser Electronics, <https://bit.ly/3cMIv5r>, Erişim Tarihi: 01.04.2022.
7. Analog Devices, <https://bit.ly/3rzPqDA>, Erişim Tarihi: 01.04.2022.
8. NXP Semiconductor, <https://bit.ly/381Yj1B>, Erişim Tarihi: 01.04.2022.
9. Micro Semiconductor, <https://bit.ly/3KTdFEed>, Erişim Tarihi: 01.04.2022.
10. Gaura, E. I., Rider, R. J., Steele, N., Naguib, R. N. 2001. Neural-network Compensation Methods for Capacitive Micromachined Accelerometers for Use in Telecare Medicine, IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 5(3), 248-252.
11. H. Hasan, M., Abbasalipour, A., Nikfarjam, H., Pourkamali, S., Emad-Un-Din, M., Jafari, R., Alsaleem, F., 2021. Exploiting Pull-in/pull-out Hysteresis in Electrostatic MEMS Sensor Networks to Realize a Novel Sensing Continuous-time Recurrent Neural Network, Micromachines, 12(3), 268.
12. Hollis, P., Paulos, J., 1990. Artificial Neural Networks Using MOS Analog Multipliers, IEEE Journal of Solid-state Circuits, 25(3), 849-855.