

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİ 4.0 KESTİRİMCİ BAKIM
SÜREÇLERİNDE İSTEME ÖZGÜ MEMS (MİKRO
ELEKTRO-MEKANİK SİSTEMLER) TABANLI
SENSÖRLERİN AKSİYOMATİK TASARIMLA
SEÇİM PROBLEMİ**

Arif Sercan EREZ

Ekim, 2020

İZMİR

**ENDÜSTRİ 4.0 KESTİRİMCİ BAKIM
SÜREÇLERİNDE İSTEME ÖZGÜ MEMS (MİKRO
ELEKTRO-MEKANİK SİSTEMLER) TABANLI
SENSÖRLERİN AKSİYOMATİK TASARIMLA
SEÇİM PROBLEMİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı

Arif Sercan EREZ

Ekim, 2020

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ARİF SERCAN EREZ, tarafından **PROF.DR.MEHMET ÇAKMAKÇI** yönetiminde hazırlanan **“ENDÜSTRİ 4.0 KESTİRİMCİ BAKIM SÜREÇLERİNDE İSTEME ÖZGÜ MEMS (MİKRO ELEKTRO-MEKANİK SİSTEMLER) TABANLI SENSÖRLERİN AKSİYOMATİK TASARIMLA SEÇİM PROBLEMİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKÇI

Yönetici

Prof. Dr. Meltem Evren TOYGAR

Dr.Öğr.Üyesi Özgün BAŞER

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŐEKKÖR

Çalıőmalarım süresince hiçbir desteğini esirgemeden yanımda olan aileme, kendisi de bilim insanı ve mühendis olan değerli eőime, bilim insanı ve akademisyen yönünden birçok şey öğrendiğim değerli danıőman hocam Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKÇI'ya, çalıőmalarımı yürüttüğüm tez sürecinin her aşamasında desteklerini esirgemeyen Dedem Mekatronik Araştırma Geliőtirme Merkezi'ne ve ilgili yüksek lisans tezinin bildiriye dönüőmesi sürecine destek olan Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü kurumuna teşekkür ederim.

Arif Sercan EREZ

ENDÜSTRİ 4.0 KESTİRİMCİ BAKIM SÜREÇLERİNDE İSTEME ÖZGÜ MEMS (MİKRO ELEKTRO-MEKANİK SİSTEMLER) TABANLI SENSÖRLERİN AKSİYOMATİK TASARIMLA SEÇİM PROBLEMİ

ÖZ

Bu tez çalışmasının amacı endüstriyel alandaki makine v.b sistemlerin Endüstri 4.0 kestirimci bakım kapsamında ölçülmek istenen farklı parametrelerine özgü (ses, titreşim, akış v.b) olarak nanobilim alanındaki MEMS (Mikro Elektro-Mekanik Sistem) tabanlı sensörlerin aksiyomatik tasarım metodu uygun tasarımın bu metotla seçilmesinin araştırılmasıdır. Tez çalışması kapsamında ve devamında özel bir Ar-Ge merkezinde literatür taramasının ilerletilmesi, üniversite-sanayi işbirliği çalışmalar yapılması, bu çalışmalar ile uygulamalı bir projeye dönüştürülerek firmaların kestirimci bakım proseslerinde uygun MEMS tabanlı sensörün testlerinin yapılması hedeflenmektedir. MEMS tabanlı sensörlerin üretiminde kullanılan ve tasarımını/modellenmesini şekillendiren en uygun yöntemin (litografi v.b) tespitinin yapılması için kavramsal araştırmalar yapılacaktır. Modelleme / desenleme sürecinden sonra, sensör tabanının/membranının boyutsal ve benzer parametreleri optimize edilecek ve aksiyomatik tasarım yöntemi ile en uygun tasarım seçilecektir. Son olarak MEMS tabanlı sensörler için yapılan seçimlerin nano ölçekteki NEMS (Nano Elektro-Mekanik Sistem) tabanlı sensörler için de uygun olup olmadığı değerlendirilecektir (Erez ve diğer., 2020).

Anahtar kelimeler: Aksiyomatik Tasarım, bulanık mantık ilişkileri, endüstri 4.0, MEMS(Mikro Elektro-Mekanik Sistemler), NEMS (Nano Mikro Elektro-Mekanik Sistemler), önleyici bakım

THE PROBLEM OF SELECTION WITH THE AXIOMATIC DESIGN OF MEMS (MICRO ELECTRO-MECHANICAL SYSTEMS) BASED SENSORS IN INDUSTRY 4.0 PREDICTIVE MAINTENANCE PROCESSES

ABSTRACT

The aim of this thesis study is to investigate the axiomatic design method of MEMS (Micro Electro-Mechanical System) based sensors in the field of nanoscience specific to the different parameters (sound, vibration, flow, etc.) of machines etc. Within the scope of the thesis study and afterwards, it is aimed to advance the literature review in a special R&D center, to carry out university-industry cooperation studies, to transform into an applied project with these studies and to test the appropriate MEMS-based sensor in the predictive maintenance processes of the companies. Conceptual research will be conducted to determine the most appropriate method (lithography etc.) used in the production of MEMS based sensors and shaping their design / modeling. After the modeling / patterning process, the dimensional and similar parameters of the sensor base / membrane will be optimized and the most suitable design will be selected by the axiomatic design method. Finally, it will be evaluated whether the choices made for MEMS-based sensors are also suitable for nano-scale NEMS (Nano Electro-Mechanical System) based sensors (Erez et al., 2020).

Keywords: Axiomatic Design, fuzzy logic relationships, industry 4.0, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), NEMS (Nano Micro Electro-Mechanical Systems), preventive maintenance

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ	ix
BÖLÜM BİR - GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ - MATERYAL VE METOT.....	2
2.1 Endüstri 4.0	2
2.2 Kestirimci Bakım	3
BÖLÜM ÜÇ - MEMS	5
3.1 MEMS Teknolojisi	5
3.2 Mikro Elektro Mekanik Sistemin Uygulama Alanları	6
3.3 MEMS Tarihçe	7
3.4 MEMS Üretim Teknikleri	8
3.5 MEMS Tabanlı Sensörler.....	9
BÖLÜM DÖRT – AKSİYOMATİK TASARIM.....	11
4.1 Aksiyomatik Tasarım Yöntem Tanımlamaları.....	11
4.2 Aksiyomatik Tasarım Metodolojisine Giriş.....	12
4.3 Bulanık(Fuzzy) Sayılarla Aksiyomatik Tasarım Yöntemi.....	15

BÖLÜM BEŞ – UYGULAMA.....18

5.1	Uygulama Örnekleri	18
5.2	Bulanık Aksiyomatik Tasarımın MEMS Üzerinde Uygulanması.....	20
5.3	Membran Sapma Teorisi ve Sonlu Elemanlar Modelleme Analizi.....	22
5.4	MEMS Membran Seçim Probleminin Karar Modeli	23

BÖLÜM ALTI – DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....27

BÖLÜM YEDİ –SONUÇ.....29

KAYNAKLAR.....30

EKLER.....34

EK-1:Örnek bulanık sayılarla bilgi içeriği hesaplama gösterimi 1.aşama.....	34
EK-2:Örnek bulanık sayılarla bilgi içeriği hesaplama gösterimi 2.aşama.....	35

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 Mikro Elektro Mekanik Sistem cihazının elektron mikroskop altındaki görünümü.....	6
Şekil 3.2 Fotolitografik yöntemin gösterimi.....	9
Şekil 3.3 MEMS sensörünün temsili gösterimi.....	10
Şekil 4.1 Ayrık değişken olarak ifade edilen bir FR'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	14
Şekil 4.2 Sürekli rastgele değişken olarak ifade edilen bir FR'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	15
Şekil 4.3 Üçgensel sayıların gösterimi.....	16
Şekil 4.4 Sistem yelpazesi ile tasarım yelpazesinin kesişim alanı.....	17
Şekil 5.1 Basınç sensörünün şematik gösterimi.....	19
Şekil 5.2 MEMS sensör membranının geometrisi ve örnek SEM modeli.....	22
Şekil 5.3 Problemin tasarım (karar) modeli.....	23
Şekil 5.4 Somut olmayan faktörler için üçgen bulanık sayılar.....	25

TABLULAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1 Çeşitli diyaframların maksimum sapma ve gerilim/stres karşılaştırması.....	18
Tablo 5.2 Tasarım aralığı ve sayısal olarak ifade edilen kriterlerin sistem aralığı.....	23
Tablo 5.3 Normalleştirilmiş karar matrisi.....	24
Tablo 5.4 Bulanık(Fuzzy) dil değişkenleriyle ifade edilen ölçütlerin tasarım aralığı ve sistem aralığı.....	25
Tablo 5.5 Alternatifler için bulanık üçgen sayılarla ifade edilen tasarım aralığı ve sistem kriter aralığı.....	26
Tablo 6.1 Her bir MEMS sensör membran alternatifleri için bilgi içeriğinin hesaplanması.....	28

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Günümüzde, mühendisler birçok sektörde çok kriterli karar verme sorunları ile karşı karşıyadır. Bir ürünü veya süreci tasarlarken, tasarım kriterlerini karşılaştırarak seçilmesi gereken birçok alternatif vardır. Bu bağlamda, Aksiyomatik Tasarım (Axiomatic Design-AD), tasarım sürecinde daha bilimsel bir sistem, süreç ve ürün tasarımı formunu elde etmek için en sık kullanılan karar verme yöntemi haline gelmiştir. Bu çalışmada da mikro ve nano elektrik mekanik sistem (MEMS ve NEMS) tabanlı sensörler bazında optimum tasarım modelinin seçilmesi için bu metot kullanılacaktır.

Ölçek bazında oldukça küçük olan MEMS/NEMS tabanlı cihazların ve sensörlerin üretilmesi oldukça maliyetli ve kompleks işlemler gerektirmektedir. Bu bağlamda üretmeden önce tasarım doğrulaması oldukça önemlidir. Ayrıca bu cihazların ve sensörlerin yüksek hassasiyet gerektiren ve hataya yer olmayan biyomedikal ve benzeri uygulamalarda birer duyu organı kullanılması sebebiyle tasarım optimizasyonu oldukça önemlidir. Tasarım optimizasyonu ve/veya optimum tasarımın seçimi sadece farklı geometrik alternatiflerin seçimini değil aynı zamanda sensörlerin alt bileşenlerinin seçimini de kapsamaktadır. Bu çalışmada tasarım optimizasyonu sürecinde tasarım doğrulama ve analiz çalışmaları da yer alacaktır. Optimum tasarımı seçilen MEMS/NEMS tabanlı sensörler günümüzde gittikçe popüler hale gelen endüstri 4.0 süreçlerinin alt dalı olan kestirimci bakım ile “konuşan veya öğrenen makineler” konusunda bir araç olacaktır. Bu çalışma kapsamında endüstri 4.0 ve kestirimci bakım kavramlarından da genel hatlarıyla bahsedilecektir.

BÖLÜM İKİ

MATERYAL VE METOT

2.1 Endüstri 4.0

Günümüzün en popüler kavramlarından biri olan Endüstri 4.0 veya dördüncü sanayi devrimi olarak bilinen yenilikçi süreçler, tüketicilerin sürekli olarak değişen gereksinimlerine hızlı ve aynı anda uyum sağlayan üretim sistemlerini ve birbirleriyle haberleşebilen ve koordine bir şekilde çalışan otonom sistemleri ifade etmektedir.

Dördüncü sanayi devrimi "Endüstri 4.0", dijital teknolojiye tüm yeniliklerin, özellikle imalat sektöründe, dönüşüm sürecinde olgunlaşması anlamına gelmektedir. Bu teknolojiler özellikle gelişmiş internet, yapay zeka ve robotik, gelişmiş sensör teknolojisi, veri aktarımını ve kullanımını hızlandıran bulut teknolojisi, dijital üretim, yeni hizmetler ve pazarlama modelleri, akıllı telefonlar ve navigasyon araçları, teslimat ve sürüş hizmetleri ve otonom araçlar için algoritmalarıdır (Cakmakçı, 2019).

Endüstri 4.0 kavramının alt konularından olan nesnelerin interneti (Internet of Things-IoT) konusudur. Nesnelerin İnterneti (IoT), internet üzerinden diğer cihazlara ve sistemlere bağlanmak ve veri alışverişi yapmak amacıyla sensörler, yazılımlar ve diğer teknolojilerle gömülü fiziksel nesne ağını tanımlar. Radyo frekansı tanımlama (RFID) cihazları sensör teknolojileri ile "nesne" kavramlarını etiketleyerek bunları izleme prensibine dayanır. Nesnelere etiketleme ve izleme endüstriyel alana taşındığında ise makinelerin izlenmesi, makinelerin çalışmaları sırasında onlardan veri alınarak bu verilerin anlamlı çıkarımlara dönüştürülmesi süreçleri ortaya çıkmaktadır. Bu sürecin bir sonraki adımı ise makinelerin çalışma verilerinin kesintisiz olarak toplanıp yorumlanarak kestirimci bakım veya diğer adıyla önleyici bakım gibi bazı uygulamalarında kullanılmasıdır (Hedricks, 2015).

2.2 Kestirimci bakım

Kestirimci bakım teknikleri, makinelerin bakımın ne zaman yapılması gerektiğini tahmin etmek için hizmet içi ekipmanın durumunu belirlemeye yardımcı olmak üzere tasarlanmıştır. Bu yaklaşım, rutin veya zamana dayalı bakıma göre maliyet tasarrufu vaat etmektedir. Bu nedenle, bir öğenin bozulma durumunun tahminlerinin önerdiği şekilde koşul temelli bakım olarak kabul edilir (Mobley ve Keith, 2016).

Kestirimci bakımın ana vaadi, düzeltici bakımın uygun şekilde planlanmasına olanak sağlamak ve beklenmedik ekipman arızalarını önlemektir. Diğer bir ifadeyle ekipman ömrü için doğru bilgi, artan tesis güvenliği, çevreye olumsuz etkisi olan daha az kaza ve optimize edilmiş yedek parça durumlarının sağlanmasıdır. Kestirimci bakım, koruyucu bakımdan farklıdır çünkü bakımın ne zaman gerekli olacağını tahmin etmek için ortalama veya beklenen kullanım ömrü istatistiklerinden ziyade ekipmanın gerçek durumuna dayanır.

Kestirimci bakımın uygulanması için gerekli olan ana bileşenlerden bazıları veri toplama ve ön işleme, erken arıza tespiti, arıza tespiti, arızaya kadar geçen süre tahmini, bakım planlaması ve kaynak optimizasyonudur (Amruthnath ve Gupta, 2018).

Genel olarak piyasayı ve literatürü incelediğimizde kestirimci bakım konusunda farklı uygulamaların olduğu görülmektedir. Bu uygulamalardan biri titreşim analizi yapmaktır. Bu, yüksek devirli makinelere sahip üretim tesislerinde kestirimci bakım için başvurulacak analiz türüdür. Her bir makine parçasının farklı titreşimleri olduğu düşünülürse frekans ve faz ölçümü ile olağan durum haricinde bir titreşim frekans bilgisi geldiğinde arıza tahminlemesi yapılabilir.

Akustik analiz (sonik) uygulamasında ise basınçlı hava kaçaqları v.b istenmeyen durumlarda belirli Hz değerlerinin üzerine çıkan seslerin analiz edilmesi ile arıza tespiti yapılır. Kızılötesi analizinde ise sıcaklık, makinelerdeki potansiyel sorunların iyi bir göstergesi olduğundan, kızılötesi analiz oldukça sık kullanılır. Genellikle soğutma, hava akışı ve motor stresi ile ilgili sorunları tanımlamak için kullanılır.

Genel olarak açıklanan kestirimci bakım uygulamalarında basınç parametresinin ölçülmesi de olası bir arıza durumunun tahminlenmesinde kullanılabilir. Piezorezistif basınç sensörleri, örneğin pres makinelerinin kestirimci / önleyici bakım uygulamalarında kullanılabilir. İlgili basınç sensörleri, çelik ve alüminyum levhaların çekildiği, delindiği ve büküldüğü pres makinelerindeki hidrolik basıncı değerlerini takip eder ve izler. Bir şekillendirme hatası veya benzeri bir hata sebebiyle limit değerleri aşan aşırı basınç oluşması durumunda, bu durum hemen tespit edilir ve kontrol cihaz sistemine iletilir (Turck, 2018).

Bu çalışma kapsamında da basınç sensörlerinin MEMS/NEMS tabanlı olanları inceleneceği için bu sensörleri genel anlamda özetleyecek olursak; önleyici bakım süreçlerinde bu sensörlerden sinyal alıp sistem basıncı limit değerlerin altına düştüğü durumlarda bakım ekibine veya ilgili kişilere sinyal ve alarm göndermek için kullanılır

Endüstri 4.0 süreçleri kapsamında yer alan kestirimci bakım uygulamalarında endüstriyel titreşim sensörü, basınç sensörü v.b bileşenler ilgili parametrelerin ölçümü için kullanılmaktadır. Nano ve mikro ölçekte yapılan çalışmalar neticesinde ortaya çıkarılan ve makro ölçekteki cihazlara ve sensörlere göre düşük maliyet, yüksek performans ve benzeri avantajlara sahip olan NEMS(Nano Elektrik Mekanik Sistemler) / MEMS (Nano Elektrik Mekanik Sistemler) tabanlı cihazlar ve sensörler kestirimci bakım uygulamalarında makro ölçekteki cihazların ve sensörlerin yerini almaktadır.

Bu çalışma kapsamında da MEMS tabanlı cihazlar ve sensörlerin tasarımları optimize edilmesiyle ilgili (boyutsal, malzeme seçimi v.b) araştırmalar aktarılacak, NEMS tabanlı cihazlar/sensörlere bu araştırmaların uygulanabilirliği tartışılacak ve yol açacağı akademik çalışmanın kapsamında bahsedilecektir.

BÖLÜM ÜÇ

MEMS

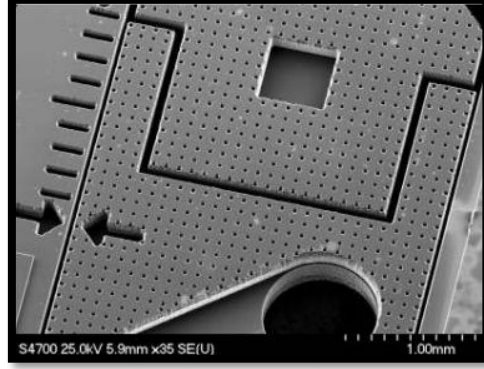
3.1 MEMS Teknolojisi

Mikro elektromekanik sistemler (veya mikroelektronik ve mikroelektromekanik sistemler) olarak da ifade edilen mikro elektromekanik sistemler (MEMS) ve ilgili mikro mekatronik ve mikro sistemler mikroskobik cihazların, özellikle hareketli parçalı olanların teknolojisini oluşturmaktadır. Nano ölçekte nano elektromekanik sistemler (NEMS) ve nanoteknoloji ile birleşirler. MEMS, Japonya'da mikro makineler ve Avrupa'da mikro sistem teknolojisi (MST) olarak da anılır.

MEMS, boyut olarak 1 ila 100 mikrometre (yani 0,001 ila 0,1 mm) arasındaki bileşenlerden oluşur ve MEMS cihazlarının boyutu genellikle 20 mikrometreden bir milimetreye (yani 0,02 ila 1,0 mm) kadar değişir. Ancak bileşenler diziler halinde düzenlenmiştir (Gabriel, Jarvis ve Trimmer,1988). Genellikle verileri işleyen merkezi bir birimden (mikroişlemci gibi bir entegre devre yongası) ve çevreyle etkileşime giren birkaç bileşenden (mikro sensörler gibi) oluşurlar. MEMS'nin geniş yüzey alanı hacim oranı nedeniyle, ortam elektromanyetizması tarafından üretilen kuvvetler (örneğin, elektrostatik yükler ve manyetik momentler) ve akışkan dinamiği (örneğin, yüzey gerilimi ve viskozite), daha büyük ölçekli mekanik cihazlardan daha önemli tasarım konularıdır.

Çok küçük makinelerin potansiyeli, onları yapabilecek teknoloji ortaya çıkmadan önce ilgiyle karşılandı. Örneğin, Richard Feynman'ın "Aşağıda daha çok yer var" sloganının ortaya çıktığı ünlü 1959 dersi buna bir örnektir. MEMS, normalde elektronik yapımında kullanılan modifiye yarı iletken cihaz üretim teknolojileri kullanılarak üretilbildiğinde pratik hale gelmiştir. (Angell, Terry ve Barth,1983).

Bunlar arasında kalıplama ve kaplama, ıslak aşındırma (KOH, TMAH) ve kuru aşındırma (RIE ve DRIE), elektrik deşarjı işleme (EDM) ve küçük cihazlar üretebilen diğer teknolojiler bulunur. MEMS cihazının görünümü Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Mikro Elektro Mekanik Sistem cihazının elektron mikroskop altındaki görünümü (Cornelius, 2003)

3.2 Mikro Elektro Mekanik Sistemin Uygulama Alanları

MEMS'in boyut avantajı ve benzeri sebeplerden dolayı gelişen teknoloji ile birlikte birçok uygulama alanı ortaya çıkmıştır. MEMS sistemlerin bazı yaygın ticari uygulamaları şunları içerir:

- Kağıt üzerine mürekkep biriktirmek için piezoelektrik veya termal kabarcık çıkarma kullanan inkjet yazıcılar bu gruptadır.
- Hava yastığının açılması ve elektronik denge kontrolü dahil olmak üzere çok sayıda amaç için modern otomobillerde kullanılan ivmeölçerler bu gruptadır.
- Atalet Ölçüm Birimleri (IMU'lar): Uzaktan kumandalı veya otonom helikopterlerde, uçaklarda ve çoklu motorlarda (aynı zamanda drone olarak da bilinir) kullanılan MEMS İvmeölçerler ve MEMS jiroskopları bu gruptadır.
- MEMS manyetik alan sensörü (manyetometre) da yönlü yön sağlamak için bu tür cihazlara dahil edilebilir.

- MEMS aynı zamanda modern arabaların, uçakların, denizaltıların ve diğer araçların eylemsiz navigasyon sistemlerinde (INS'ler) sapma, eğim ve yuvarlanmayı tespit etmek için kullanılır; örneğin, bir uçağın otopilotu buna örnektir (Acar ve Shkel, 2008).
- Oyun denetleyicileri (Nintendo Wii), kişisel medya oynatıcılar / cep telefonları (neredeyse tüm akıllı telefonlar) ve bir dizi Dijital Fotoğraf Makinesi (çeşitli Canon Digital IXUS modelleri) gibi tüketici elektroniği cihazlarındaki ivmeölçerler bu gruptadır. (Johnson, 2007).
- MEMS barometreler bu gruptadır.
- Cep telefonları, kulaklıklar ve dizüstü bilgisayarlar gibi taşınabilir cihazlardaki MEMS mikrofonları. Akıllı mikrofon pazarı, akıllı telefonları, giyilebilir cihazları, akıllı ev ve otomotiv uygulamalarını içerir (Clarke, 2016).
- Araba lastiği basınç sensörleri ve tek kullanımlık kan basıncı sensörleri de MEMS silikon basınç sensörü grubundadır (Becker, 2002).

3.3 MEMS Tarihçe

MEMS teknolojisinin kökleri silikon devrimine dayanır ve 1959'dan itibaren iki önemli silikon yarı iletken icadına kadar uzanabilir: Fairchild Semiconductor'da Robert Noyce tarafından yapılan monolitik entegre devre (IC) yongası ve MOSFET (metal oksit yarı iletken alan etkili transistör) bileşenin ortaya çıkması ve IC yongalarındaki bu transistörlerin minyatürleştirilmesi olan MOSFET ölçeklendirmesi, elektroniğin minyatürleştirilmesine yol açtı. Bu, silikon yongaların ve MOSFET'lerin çevreyle etkileşime girip iletişim kurabileceğini ve kimyasallar, hareketler ve ışık gibi bileşenleri işleyebileceğini fark ettikçe, silikon yarı iletken teknolojisine dayalı mikro işleme teknolojisinin gelişmesiyle mekanik sistemlerin minyatürleştirilmesinin temellerini attı.

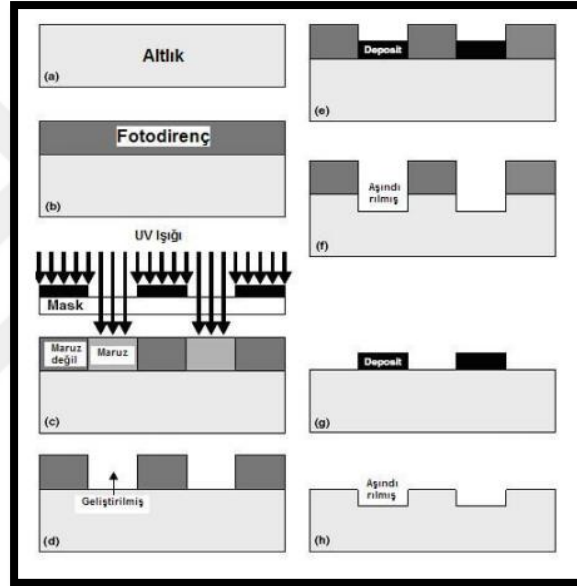
İlk silikon basınç sensörlerinden biri, 1962'de Honeywell tarafından izotropik olarak mikro işlenmişti (Rai-Choudhury, 2000).MEMS cihazının erken bir örneği, 1965'te Harvey C. Nathanson tarafından geliştirilen, MOSFET'in bir uyarlaması olan rezonant-geçit transistörüdür. Bir başka erken örnek, 1966 ve 1971 yılları arasında Raymond J. Wilfinger tarafından patentlenmiş bir elektromekanik monolitik rezonatör olan rezonistördür. 1970'lerden 1980'lerin başına kadar, fiziksel, kimyasal, biyolojik ve çevresel parametreleri ölçmek için bir dizi MOSFET mikro sensör geliştirildi (Bergveld ve Piet, 1985).

3.4 MEMS Üretim Teknikleri

Günümüzde kullanılan MEMS üretimi için birkaç fabrikasyon tekniği vardır. Normalde bir MEMS cihazını imal etmek için bu tekniklerden birden fazlası kullanılır. MEMS'i üretmek için, yarı iletken IC(Entegre Devre) fabrikasyon teknolojisinden miras alınan özellikleri özelliği, kompleks bir mikro işleme süreciyle birleştirmek gereklidir. Bu tekniklerden en önemlilerini sıralayabiliriz. IC Fabrikasyon tekniği bunlardan biridir. Bu işlem, tipik entegre devreleri üretmek için kullanılan normal bir tekniktir. Süreç, bu adımlardan geçen parlatılmış bir silikon alt tabaka ile başlar. Aktif ve pasif bileşenler oluşturmak için plakanın üzerine ince bir film yerleştirilmektedir. Film türü epitaksiyel silikon, silikon dioksit (SiO_2), silikon nitrür (Si_3N_4) polisilikon, bir metal ve diğerlerini içerir. Doplama aşamasında ise, alt tabakanın farklı yerlerde iletkenliğini kontrol etmek için, termal biriktirme veya iyon implantasyonu yoluyla düşük düzeyde bor, fosfor vb. bileşenler eklenmektedir (Munro, 2019).

Yüzey Mikro İşleme tekniği ise MEMS cihazlarının üretimi için çok popüler bir tekniktir. Kalıcı mekanik yapısal (cihaz) katmanların üzerine inşa edileceği geçici bir katman görevi gören ince bir film malzemesinin biriktirilmesiyle başlayan bir dizi adımdan oluşur. İlk ince film birikimini, kalıcı yapı olacak malzemenin biriktirilmesi ve desenlenmesi izler. Daha sonra geçici tabakanın kaldırılması mekanik yapıyı serbest bırakır.

En bilindik yöntemlerden biri ise Litografi ve dağlama tekniğidir. Alt plaka üzerinde belirli desenler üretmek için tasarlanmış maskeler kullanılarak ve fotorezist adı verilen ışığa duyarlı bir kimyasal kullanılarak bir desen oluşturulur ve plakaya aktarılır. Fotolitografi adı verilen bu işlem, ya safsızlık bileşenlerini eklemek ya da plakayı belirli desenlerde aşındırmak için kullanılır. Aşındırma, bileşenleri betimlemek ve şekillendirmek için ince filmin veya alt tabakanın istenmeyen bölgelerini seçici olarak çıkarmak için kullanılan bir işlemdir. İki aşındırma yöntemi vardır: ıslak ve kuru aşındırma (Jaeger, 1988). Fotolitografik yöntemin aşamaları Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Fotolitografik yöntemin gösterimi

3.5 MEMS Tabanlı Sensörler

MEMS tabanlı sensörler, düşük maliyetli ve yüksek doğruluklu atalet sensörleri olup, bunlar çok çeşitli endüstriyel uygulamalara hizmet etmek için farklı amaçlarda kullanılır. Şekil 3.3’de görüldüğü üzere sensör, mikro-elektro mekanik sistem adı verilen çip tabanlı bir teknoloji kullanır. Bu sensörler, basınç gibi harici uyarımı algılamının yanı sıra ölçmek için kullanılır, daha sonra ölçülen basınç etkisine bazı mekanik eylemler yardımıyla yanıt verir.

Bunun en iyi örnekleri, basınç değişikliğini telafi etmek için bir motorun döndürülmesidir. MEMS entegre kart üretimi silikon ile yapılabilir, bu sayede hafif malzeme katmanları bir Si substrat üzerine sabitlenir. Bundan sonra diyaframlar, kirişler, kollar, yaylar ve dişliler gibi mikroskobik 3B yapılar sabitlenir.



Şekil 3.3 MEMS sensörünün temsili gösterimi (Elprocus, 2018)

MEMS fabrikasyonu, oksidasyon işlemi, difüzyon işlemi, iyon implantasyon işlemi, düşük basınçlı kimyasal buhar biriktirme işlemi, püskürtme, vb. gibi diğer yarı iletken devreleri oluşturmak için kullanılan birçok tekniğe ihtiyaç duyar. Ek olarak, bu sensörler mikro işleme gibi belirli bir işlemi kullanır. MEMS sensör çalışma prensibini inceleyecek olursak, eğim MEMS sensörüne uygulandığında, dengeli bir kütle elektrik potansiyeli içinde bir fark yaratır. Bu, kapasitanstaki bir değişiklik gibi ölçülebilir. Ardından bu sinyal, dijital kararlı bir çıkış sinyali oluşturmak için değiştirilebilir. Bu sensörler, endüstriyel otomasyon, konum kontrolü, dönüş ve eğim ölçümü ve platform seviyelendirme gibi maksimum doğruluğu gerektirmeyen bazı uygulamalar için iyi çözümlerdir. Piyasada yaygın olarak bulunan MEMS sensörleri, MEMS ivmeölçerler, MEMS jiroskopları, MEMS basınç sensörleri MEMS manyetik alan sensörleri olarak listelenebilir (Shaby ve diğer., 2014).

MEMS tabanlı cihazları üretmeden önce tasarım aşamasında optimizasyon süreçlerinin yürütülmesi gerekmektedir. Bu bağlamda endüstri mühendisliği çalışma alanlarında yer alan çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan aksiyomatik tasarım metodu ile tasarım optimizasyon süreçlerinin nasıl yürütüleceği aktarılacaktır.

BÖLÜM DÖRT

AKSİYOMATİK TASARIM

4.1 Aksiyomatik Tasarım Yöntem Tanımlamaları

Aksiyomatik tasarım(Axiomatic Design), sistem, süreç ve ürün tasarımını daha bilimsel ve sistematik hale getirmek için geliştirilmiş bir yöntemdir (Suh, 2001). Tasarım sürecine başladığımızda iki soru sormamız gerekiyor: “Neyi başarmak istiyoruz? “Ve“ Bunu nasıl yapabiliriz? ”. Suh tarafından önerilen AD Metodunun amacı, tasarımları bilimsel bir temel üzerine oturtmaktır.

Literatür araştırmasının bir sonucu olarak, sızdırmazlık malzemesinin seçiminden tedarikçinin seçimine kadar, iş satın alma sürecindeki personel alternatiflerinin değerlendirilmesine kadar birçok vaka çalışması bulunmaktadır. Örneğin, yakın tarihli bir çalışmada, bir makine imalat şirketi için en uygun sızdırmazlık malzemesinin seçilmesi sorunu ele alınmıştır (Ozel ve diğer., 2006). Sızdırmazlık malzemelerinin tasarım aralıkları ve sistemin gerektirdiği sistem aralıkları belirlenmiştir. ve bunların ortak aralıkları belirlenmiş ve bilgi içerikleri hesaplanmıştır. En düşük bilgi değerine sahip olan sızdırmazlık malzemesi en iyi ve en uygun alternatif olarak bulunmuştur.

Bir başka çalışmada, beyaz eşya üreticisi için tedarikçi seçme sorunu tartışılmış ve sorunu çözmek için Bulanık AD yöntemi kullanılmıştır (Güngör, 2016). Bu çalışma gibi bazı durumlarda, fonksiyonel gereksinimlerin sistem aralıkları ve tasarım aralıkları her durumda aralık olarak tanımlanamaz. Belirli bir değer üzerinde ya da değer altında olduğu ifade edilebilir ve bu değerler üçgen veya trapezoidal sayılarla temsil edilebilir. Aşağıdaki bölümlerde ifade edileceği gibi, aksiyomatik tasarım yöntemi bağımsızlık aksiyomu ve bilgi aksiyomu olmak üzere iki farklı aksiyoma ayrılmaktadır. Bazı çalışmalarda, sadece bilgi aksiyomu vurgulanmaktadır, çünkü alternatiflerin fonksiyonel gereksinimleri (Functional Requirement-FR) birbirinden etkilenmemektedir ve bağımsızdır.

Bazı çalışmalarda ise (özellikle sistem tasarımı problemlerinde) bilgi aksiyomu vurgulanmaktadır. Uygun bir tasarımda, bir fonksiyonel gereksinimin tasarım parametresi (Design Parameter-DP), diğer FR'yi etkilemede ve değiştirmeden diğer bir fonksiyonel gereksinimi sağlayacak şekilde yapılandırılabilir.

Her şeyden önce, sorunun tanımı MEMS/NEMS tasarımı seçimi sorunu kapsamında yapıldı. Daha sonra, hedefleri, membran tasarımı alternatiflerini ve bu alternatiflerde yer alan ana kriterleri ve alt kriterleri tanımlamak için karar ağaçları çizilecektir. Her kriter için tasarım ve sistem aralıkları oluşturulacaktır. Dilsel değişkenler, tasarım ve sistem aralıklarının somut ifadeleriyle ifade edilemeyen kriterler için kullanılır ve bu dilsel değişken üçgen bulanık sayılara çevrilecektir. Daha sonra, tasarım alternatifinin kesişim alanı ve her bir alternatifin her kriterinin sistem aralığı hesaplanmış ve bu alan hesaplamasından bilgi içeriği elde edilecektir.

4.2.Aksiyomatik Tasarım Metodolojisine Giriş

Aksiyomatik tasarım metodu ürün ve proses tasarımlarını bir sistematığe oturtmaktadır. Böylece tasarımcı aşağıdaki hedeflere ulaşacaktır.

- Tasarımlar için bilimsel ve akademik bir altyapı sağlamak,
- Tasarımcıya sayısal araçlar ile destek olmak,
- Rastgele arama süreçlerini azaltmak,
- Tekrarlanan deneyleri ve proses hatalarını en aza indirmek,
- Önerilen tasarımlar arasında en iyi tasarıma karar vermek

Aksiyomlar yönteminin diğer bir önemli özelliği tasarım aksiyomlarının varlığıdır. Aksiyomlar kanıtlanamayan ancak doğru olarak kabul edilen önermelerdir ve bunlar sınırlıdır. Bu yöntemde iki aksiyom kullanılır. Bunlar bağımsızlık ve bilgi aksiyomlarıdır. Bu aksiyomlar, ürün tasarımları oluşturmak ve sunulan çözümlerin en iyisini seçmek için orantılı bir temel sağlar (Ozel ve diğer., 2006).Bu çalışma kapsamında sadece bilgi aksiyomu ele alınacaktır.

Bilgi Aksiyomu, bilgi içeriğini en aza indirmek için kullanılmaktadır. Alternatif tasarımlardan bağımsızlık aksiyomunu (yani bir kriterin değişmesi diğer bir kriterin performansını etkilemiyorsa) sağlayan en iyi alternatif tasarım, asgari bilgi kapsamına sahiptir.

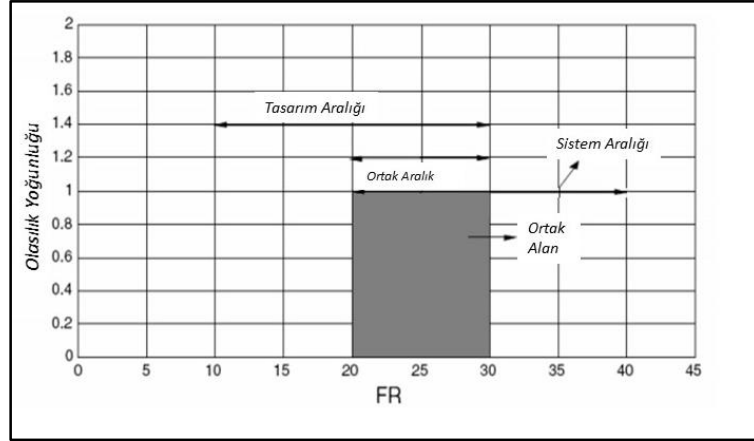
Adım 1 Bilgi aksiyomu olasılık değerleri (p_i) olarak ifade edilir. Bu nedenle, en olası seçenek en iyi tasarımdır. MEMS/NEMS tasarım tipi seçim problemi çalışmasında ilk olarak alternatifler ve ilgili kriterleri belirlenir ve bu alternatiflerin değerine fonksiyonel gereksinimlerin karşılanması olasılığına (I_i) bilgi değeri denir.

Bilgi değeri aşağıdaki denklem 4.1 ile hesaplanır:

$$I_i = \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right) \quad (4.1)$$

Bu eşitliğin olasılığı ne kadar büyük olursa, bilginin değeri o kadar küçük olur. Olasılık değeri 1 ise, logaritma değeri 0 olarak hesaplanır. Bu, fonksiyonel gereksinimin bilgi içeriğinin 0 olduğunu gösterir. Birden fazla fonksiyonel gereksinimin olasılık değeri sıfır ise, logaritmik değer sonsuzdur. Bu, tasarım için çok fazla bilinmeyen durumun olduğunu ve daha çok bilgiye ihtiyaç duyulduğunu gösterir. Aynı zamanda, logaritmik fonksiyon, karşılanması gereken birçok fonksiyonel gereksinim olma durumunda daha fazla bilgi içeriğinin eklenmesi amacıyla kullanılmıştır.

Toplam bilgi içeriği n adet FR olasılıklarının toplamıdır. Başka bir deyişle, ortak alan sistem aralığıyla çakışırsa, hesaplama işlevi değeri 0 olur. Bu değer sonsuz ise, bu seçenek istenmeyen bir durumdur çünkü işlevsel gereksinimi hiç karşılayamaz ve göz ardı edilir. Şekil 4.1, FR sistem aralığı için olasılık yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir.



Şekil 4.1 Ayırık değişken olarak ifade edilen bir FR'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu (Suh, 2001)

Adım 2. İkinci adım olarak, alternatifler ve ilgili kriterleri değerlendirilir ve sistem aralığı (System Range-SR) ve tasarım aralıkları (Design Range-DR) belirlenir. DR ve SR arasındaki kavşak alanı ortak alan (Common Range-CR) olarak ifade edilir ve sadece fonksiyonel ihtiyaçların karşılandığı alan burasıdır. Sistem alanının altında kalan alanı ortak alanın altında kalan alana bölerek, tasarımın istenen amacının gerçekleştirilmesi denklem 4.2'ye göre yapılır:

$$p_i = \frac{\text{ortak aralık}}{\text{sistem aralığı}} \quad (4.2)$$

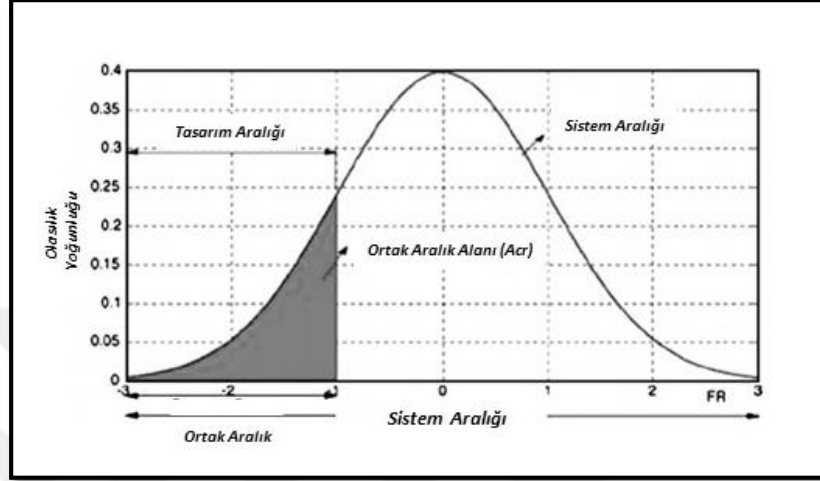
Adım 3. Denklem 4.3'ten (I_i)bilgi içeriği şu şekilde hesaplanır:

$$I_i = \log_2 \left(\frac{\text{sistem aralığı}}{\text{ortak aralık}} \right) \quad (4.3)$$

FR sabit bir rasgele değişkense, $p_s (FR_i)$ her biri için sistemin olasılık yoğunluk fonksiyonuyken (FR_i), tasarım aralığında fonksiyonel gerekliliği sağlama olasılığı ise denklem 4.4 ile hesaplanır:

$$p_i = \int_{dr_1}^{dr_u} p_s (FR_i) dFR_i \quad (4.4)$$

Şekil 4.2’de FR'nin sistem aralığı için olasılık yoğunluk fonksiyonu gösterilmiştir. Tasarım aralığı (DR) ve sistem aralığı(SR) arasındaki kesişme alanı CR (Ortak Alan) olarak belirtilir ve fonksiyonel ihtiyaçların karşılandığı yer bu alandır (Suh, 2001).



Şekil 4.2 Sürekli rastgele değişken olarak ifade edilen bir FR'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu

Bilgi içeriğinin hesaplanması denklem 4.5 ile ifade edilir. Bu denklemde A_{cr} ortak alanı gösterir.

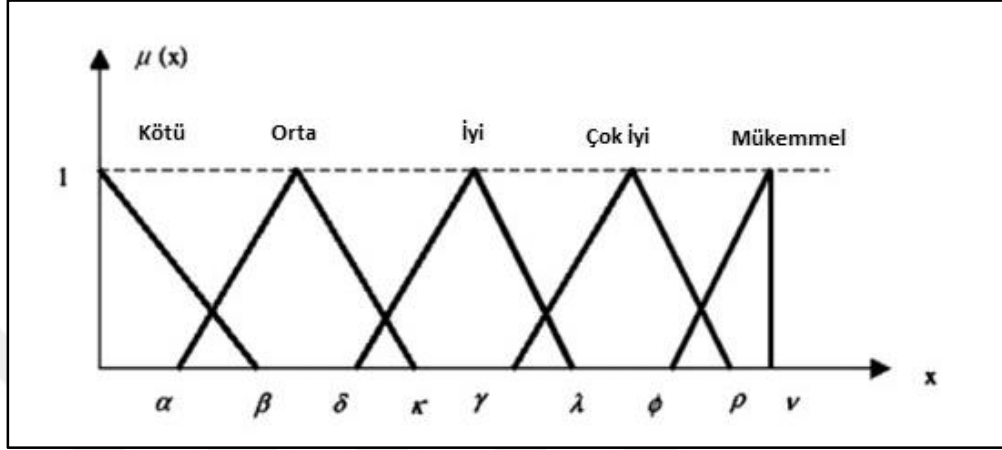
$$I_i = \log_2 \left(\frac{1}{A_{cr}} \right) \quad (4.5)$$

Adım 4. Son olarak, tüm alternatifler I değerlerinin azalan sırasına göre sıralanır ve en düşük I değerine sahip alternatif ise en iyi ve en uygun alternatif olarak belirlenir ve seçilir.

4.3 Bulanık (Fuzzy) Sayılarla Aksiyomatik Tasarım Yöntemi

Bazı durumlarda çok kriterli ve amaçlı karar verme problemleri kapsamında, tasarım aralıkları ve sistem aralıkları sayısal bir aralıkta verilemez. Örneğin: alternatif bir maliyet kriteri için tasarım aralığı, sayısal bir aralıkta ifade edilebilecek 5 \$ ile 10 \$ arasında olmalıdır. Ancak, müşteri memnuniyeti kriteri için sayısal ifadeler yerine zayıf, iyi ve benzer sözlü ifadeler kullanılmaktadır.

Bu ifadeler (dilsel değişkenler) üçgen veya trapezoidal sayılarla temsil edilebilir. Böylece, dilsel değişkenler sayısal bir aralık değerine yerleştirilir. Sistem, Şekil 4.3'deki somut olmayan ölçütler için 'Kötü-Adil – İyi – Çok İyi – Mükemmel' gibi beş dönüşüm ölçeği içerir.

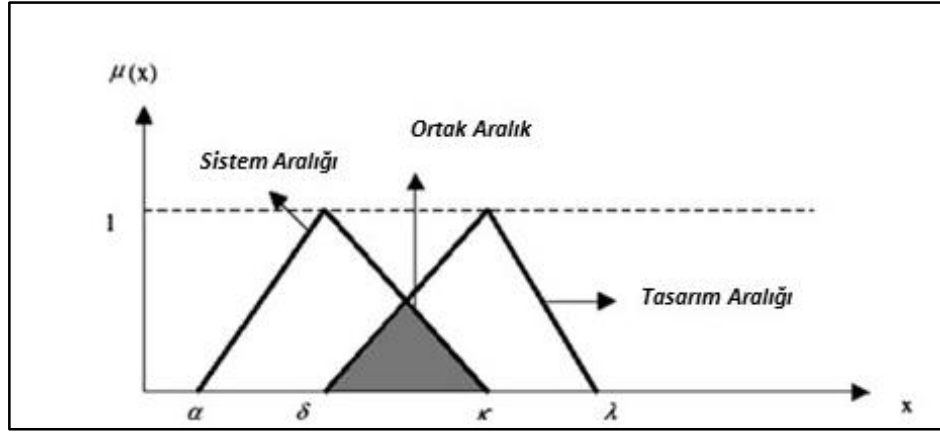


Şekil 4.3. Üçgensel sayıların gösterimi

Yukarıda gösterilen grafik yardımıyla, alternatiflerin bilgi içeriği denklem 4.6 ile hesaplanır:

$$I_i = \log_2 \left(\frac{\text{Sistem Aralığının Üçgensel Bulanık Alanı}}{\text{Ortak Alan}} \right) \quad (4.6)$$

Sistem yelpazesi ile tasarım yelpazesinin kesişimini temsil eden ortak alanın grafiksel gösterimi Şekil 4.4'deki gibidir.



Şekil 4.4 Sistem yelpazesi ile tasarım yelpazesinin kesişim alanı (Kulak ve Kahraman, 2005)

MEMS/NEMS tasarım seçim probleminde kullanılacak bulanık aksiyomatik tasarım yönteminin genel adımları aşağıdaki gibidir:

- 1- MEMS/NEMS tabanlı sensörlerin tasarım alternatiflerinin ve kriterlerinin belirlenmesi
- 2- MEMS/NEMS tabanlı sensörlerin tasarım alternatiflerinin ve kriterlerinin değerlendirilmesi
- 3- MEMS/NEMS tabanlı sensörlerin tasarım kriterleri için dilsel değişken değerlendirmelerinin sayısal dönüşümü
- 4- Her bir alternatif için kriterlerden gelen bilgi içerik puanlarının toplanması
- 5- En iyi MEMS/NEMS tabanlı sensör tasarım alternatifinin seçilmesi

Aksiyomatik tasarım diğer birçok seçim problemi ve kalite yönteminden farklıdır. Mühendisler karmaşık sistemlerin tasarımı ve üretimi ile ilgilenmektedir. Dolayısıyla aksiyomatik tasarım; karar verme sürecinin tasarlanmasına yardımcı olur, doğru kararı vermenizi sağlar. Ürünlerin kalitesini artırmaya yardımcı olur ve karmaşık sistemlerle başa çıkabilir. Gerçek verilerden sonra gelen bir yaklaşımdır. Başka bir deyişle, sonuçlara bakarak bu sonuçların kaynağını derinlemesine inceler.

BÖLÜM BEŞ

UYGULAMA

5.1 Uygulama Örnekleri

Farklı uygulama alanlarında kullanılan MEMS tabanlı cihazlar/sensörler ile ilgili geniş bir literatür araştırması yapılmıştır. Bu araştırma sonucunda farklı tiplerdeki MEMS tabanlı cihazlar /sensörler için tasarım optimizasyon çalışmaları tespit edilmiştir. Cihaz/sensör tipine göre tasarım parametreleri, kullanılan alt bileşenlerin malzemeleri v.b bileşen listeleri değişmektedir.

N Kattaboman ve arkadaşları, piezorezistif MEMS basınç sensörlerinin tasarım optimizasyonu ile ilgili çalışma gerçekleştirmişlerdir (Kattabomman ve diğer., 2012). Bu çalışma kapsamında basınç sensörünün en temel bileşeni olan sensör diyaframının geometrik şekil ve boyut alternatifleri değerlendirilerek en uygun tasarım seçilmiştir.

Farklı geometrideki ve ölçüdeki sensör diyaframlarının sonlu elemanlar analizi ile belirlenen stres v.b değerleri de gibi farklı olmaktadır.

Tablo 5.1 Çeşitli diyaframların maksimum sapma ve gerilim/stres karşılaştırması (Kattabomman ve diğer., 2012)

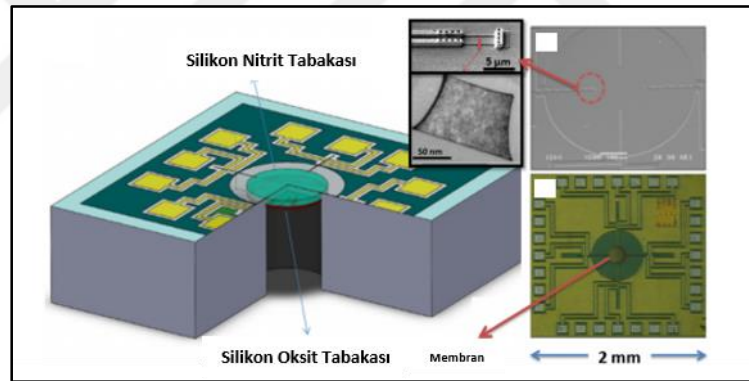
Membran Tipi	Sapma (m)	Stres (N/m ²)
Daire	0,181	0,525
Kare	0,146	0,132
Dikdörtgen	0,139	1,709

Farklı geometrideki ve ölçüdeki sensör diyaframlarının elektriksel analizleri sonucunda belirlenen çıkış voltaj değerleri de Tablo 5.1'deki gibi farklı olmaktadır. Özetle N Kattaboman ve arkadaşlarının yaptığı çalışma MEMS sensörlerin daha az tasarım kriterine ve daha az kompleks bir geometriye sahip olan diyafram bileşeni için bile tasarım kriterlerinin değişimlerinin sonuçları etkilediğini ve birbirleri ile çelişen kriterlere sahip olduğunu göstermiştir.

Anuruddh Kumar ve arkadaşları manivela tabanlı sensör uygulamalarında piezoelektrik malzeme seçimi için çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan TOPSIS yöntemini kullanarak bir çalışma yapmışlardır (Kumar ve diğer., 2015).

Bu çalışmaya göre üzere farklı piezoelektrik malzemeler farklı kriterler açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar analizi (FEM) ile manivela yapısı analiz edilmiştir. FEM ve TOPSIS çalışmaları sonucunda 2 farklı sıralama listesi oluşturulmuş ve optimum piezoelektrik malzeme seçilmiştir.

Liang Lou ve arkadaşları, bir çalışmada piezoresistif algılama elemanı olarak silikon nanoteller (SiNW'ler) kullanan 200 µm diyaframlı bir basınç sensörü geliştirdi ve Şekil 5.1'deki sensörü optimize etti. Bu çalışmada SiNW'ler, silikon nitrit (SiNx) ve silikon oksit (SiO₂) içeren çok katmanlı bir diyafram yapısına gömülmüştür.



Şekil 5.1 Basınç sensörünün şematik gösterimi (Lou ve diğer., 2012)

İlgili çalışmada doping seviyesini optimize etmek için nanotel karakterizasyonu yapılmıştır. Tüm bu süreçler sonucunda doping konsantrasyonu, SiNW bileşenlerin uzunluk farkı ve oryantasyon varyasyonları üzerindeki etkileri araştırıldıktan ve tartışıldıktan sonra en uygun kombinasyon seçilmiştir.

Yukarıda özet olarak aktarılan çalışmalara benzer literatürde birçok çalışma mevcuttur. Ancak tüm çalışmalar MEMS/NEMS sensörlerinin bir veya birkaç bileşenine odaklanmıştır ve maliyet gibi parametreler göz ardı edilmiştir.

Tüm tasarım parametrelerinin çok kriterli karar verme sistemine dahil edildiği ve daha karmaşık geometrideki tasarımlar için optimum sonucun bulunduğu bir çalışma bu tez kapsamında akademik çalışmada gerçekleştirilecektir.

Literatür taraması kapsamında tespit edilen MEMS/NEMS tabanlı sensörlerin tasarım optimizasyon çalışmalarından yola çıkılarak aksiyomatik tasarım metodu için gerekli olan tasarım kriterleri listesi oluşturulacaktır. Bu kriterlerin değer aralıkları belirlenecektir. Eğer bazı kriterler için dilsel değişkenler var ise bulanık mantık teorisine başvurulacaktır. Tasarım gereklilikleri ile sistem gerekliliklerinin kesişim kümesi olan ortak alan her bir kriter için hesaplanarak optimum MEMS/NEMS tasarım alternatifi seçilecektir. Böylece nanobilim ve nanomühendisliğin multi disiplinler yapısına uygun bir çalışma ile MEMS/NEMS bileşenlerinin tasarımlarına olumlu katkılar sağlanacaktır.

5.2 Bulanık Aksiyomatik Tasarımın MEMS Üzerinde Uygulanması

Mikro Elektro Mekanik Sistemler (MEMS) tabanlı çözümlere sahip olma isteği, minyatürleştirme ürün maliyeti avantajları, toplu işleme, düşük güç tüketimi ve güvenilirlik gibi birçok gelecek vaat eden özelliği sağladığı için modern zamanlarda muazzam bir şekilde artmaktadır. MEMS'in geleceğinin geldiği algısı ticari beklentilerle dolu; Nesnelerin İnterneti'nin (IoT) kulakları ve gözleri olarak milyarlarca MEMS tabanlı sensörün devreye alınması, endüstrileri rekabet üstünlüğü yaratmada kullanmak için yönlendirdi. Basınç sensörleri, birkaç on yıldan beri gerinim ölçerler şeklinde bilinmektedir. Silikon ve germanyumdaki piezorezistivite, basınç sensörlerinin ve diğer mekanik sensörlerin minyatürleştirilmesine yol açtı. Silikonun mükemmel mekanik özelliklerinin tanınması, bu faaliyetleri büyük bir ivme katarak daha da ilerletmiştir.

Mikro yapıların oyulması, mikroelektronik cihazların imalatındaki uzmanlık ve silikondaki entegre devreler, MEMS ve Mikrosistemlerin disiplinler arası alanının evrimini tetikledi. Mikro işlenmiş basınç sensörleri, toplu ve yüzey mikro işleme teknikleri kullanılarak üretilir.

Çeşitli cihazlar arasında, MEMS teknolojisini kullanan basınç sensörleri büyük ilgi gördü çünkü basınç sensörleri günlük yaşamda basıncı algılama, izleme ve kontrol etme gibi uygulamalar buluyor ve bu nedenle çeşitli MEMS cihazları arasında pazarın yüzde 60 ila 70'ini oluşturuyorlar.

MEMS kapasitif basınç sensörleri, paralel plaka kapasitör prensibine göre çalışmaktadır; burada birkaç mikronluk ince bir diyafram üst plaka olarak işlev görür ve alt plaka, alt tabaka üzerine litografik olarak desenlenmiş ince bir uygun malzeme tabakası ile sağlanır.

Mikro işlenmiş kapasitif basınç sensörlerinin çoğunda, sensör yapısı olarak silikon substrat kullanılır ve diyafram membran olarak polimid, kapton polimid, su-8, sıvı kristal polimerler gibi polisilikon veya polimer malzemeler kullanılır. Basınçla karşılaştığında böyle bir sistem üst plaka deforme olur; plakalar arası mesafe değişir ve uygun elektronik devreler ile algılanabilen kapasitans değişikliğine yol açar.

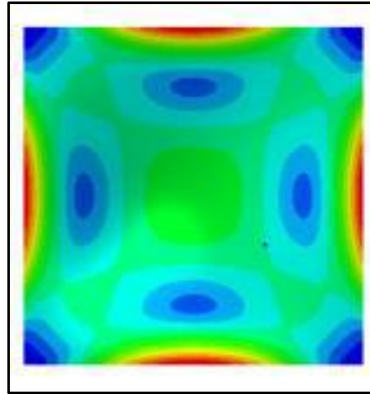
MEMS membranları farklı geometri, malzeme ve özelliklerde geliştirilebilir. Her bir farklılık MEMS basınç sensörü iletkenlik ve hassasiyet performanslarını farklı şekillerde etkileyebilir. MEMS basınç sensör alternatiflerinin membranlarının kalınlık, young modülü ve benzeri kriterlere göre aldığı değerler karşılaştırılarak en iyi performansı gösteren alternatif tespit edilebilir. Bu bağlamda bazı kriterlerin 0 ve 1 aralığında değerlendirilmesi çoklu alternatif kıyaslamalarında yetersiz kalmaktadır. Örneğin her bir kriterin aldığı parametreler olumlu ve olumsuz, yüksek ve düşük ve benzeri değerlendirilemez. Ara değerler için bu tezin belli bölümlerinde ifade edilen üyelik derecelendirme önem kazanmaktadır. Örneğin MEMS membranının kalınlık kriteri kalın veya kalın değil ifadeleri yerine çok kalın, ince, çok ince ve benzeri ara ifadelerle de değerlendirilmelidir. Böylece ara değerler alan kriterlere sahip alternatifler arasında daha hassas ve ayırıcı bir seçim yapabileceğiz. Bu noktada ise MEMS basınç sensör membranlarının seçimi için bulanık sayılar kullanılarak (üyelik dereceleri belirlenerek) aksiyomatik tasarım modeli kurulacaktır. Böylece sistemin gerektirdiği tasarımla mevcut tasarım alternatiflerinin eşleşmesi karşılaştırılacaktır.

5.3 Membran Sapma Teorisi ve Sonlu Elemanlar Analizi

Belirli bir basınç için indüklenen gerilim durumunda, kare diyafram en yüksek indüklenen voltaja sahiptir ve bu nedenle, uygulanan basınç yükü tarafından üretilen yüksek voltajlar yüksek hassasiyetle sonuçlandığından basınç sensörleri için tercih edilen geometridir.

Bu çalışmada, farklı malzeme, kalınlık vb. özelliklere sahip her MEMS sensör membranı için FEM analizleri incelenecek ve bu analizlere göre maksimum deplasman, uç gerginlik değerleri listelenecektir. Saravanan (2016),bu çalışmanın bir benzerini yapmıştır. Bu çalışmadaki deney değişmez ve aynı sonuçları veren bir süreç olduğu için bizim çalışmamızın sadece kriter parametrelerinin belirlenmesi için bu çalışmadan yararlanılacaktır.

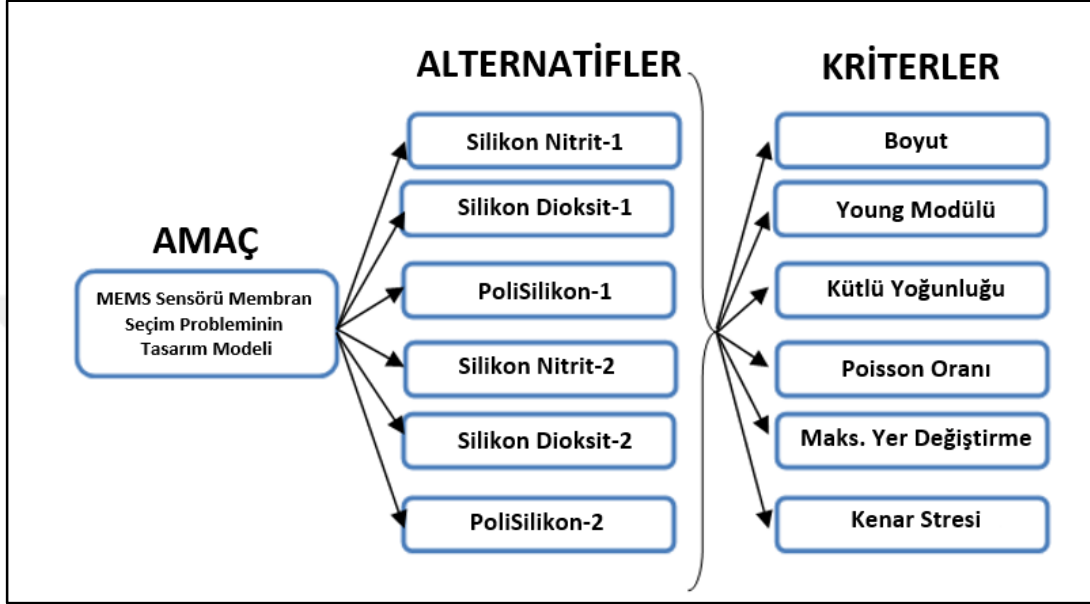
Sonlu Eleman Modellemesi (FEM), inşa edilen modelin bir kısmına basınç, kuvvet vb. gibi bir yüke mekanik tepkiyi araştırmak için kullanılır. Membranın geometrisi ve örnek FEM modeli Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Silisyum nitür, silikon dioksit ve poli silikon gibi üç malzemenin kare şeklindeki ve 500µm X500µm ölçülerindeki zarları / membranları parametrelerle modellenmiştir.



Şekil 5.2 MEMS Sensör membranının geometrisi ve örnek SEM modeli

5.4 MEMS Membran Seçim Probleminin Karar Modeli

Birden fazla alternatif ve kriterin olduğu durumlarda, en iyi alternatifi seçmek için bir karar modeli gereklidir. Bu çalışmanın karar modeli Şekil 5.3'te görülebilir:



Şekil 5.3 Problemin tasarım (karar) modeli

Bu karar modeline göre MEMS sensörü membranı için kullanılacak farklı kriterlere sahip farklı malzeme alternatifleri mevcuttur. Sayısal performans derecelendirmeleri, bulanık AD analizi için Tablo 5.2'den uyarlanmıştır.

Tablo 5.2 Tasarım aralığı ve sayısal olarak ifade edilen kriterlerin sistem aralığı

SİSTEM ARALIĞI	Malzeme (Alternatif)	Boyut (µm)	Kalınlık (µm)	Young Modülü (Gpa)	Kütle Yoğunluğu (Kg / m ³)	Poisson Oranı	Maksimum Yer Değiştirme (µm)	Kenar Stresi (Mpa)
	Silikon Nitrit-1	500X500	10	160	2500	0,25	3,25	400
	Silikon Dioksit-1	500X500	10	73	2650	0,17	7,00	420
	PoliSilikon-1	500X500	10	150	2328	0,20	3,80	390
	Silikon Nitrit-2	500X500	15	160	2500	0,25	1,00	180
	Silikon Dioksit-2	500X500	15	73	2650	0,17	2,20	170
	PoliSilikon-2	500X500	15	150	2328	0,20	1,00	190
	Tasarım Aralığı	500X500	8-14	50-150	2300-2600	0,15-0,24	2,0-6,50	0-350

Performans derecelendirmelerini bulanık dilbilime/dilsel değişkene dönüştürmek için çalışma yapıldığı gibi, Tablo 5.3'deki performans derecelendirmeleri, denklem 5.1 ile [0,1] aralığına normalleştirilir. Yani farklı kriter parametreleri karşılaştırmaya uygun olması açısından tek bir birime haline dönüştürülür.

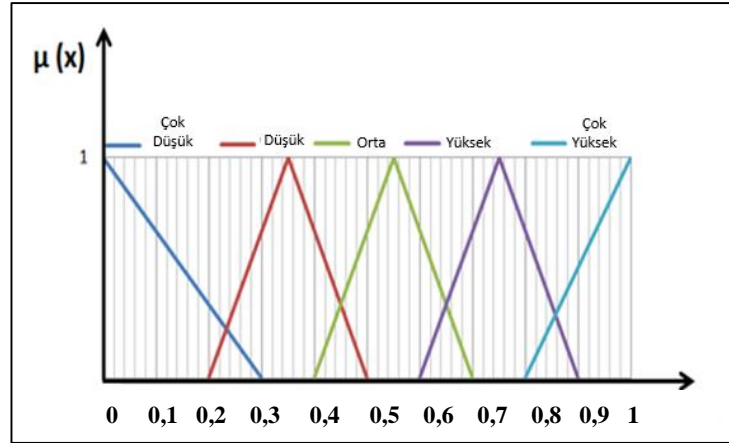
$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max\{x_{ij}\}} \quad (5.1)$$

Tablo 5.3 Normalleştirilmiş karar matrisi

SİSTEM ARALIĞI	Malzeme (Alternatif)	Boyut (µm)	Kalınlık (µm)	Young Modülü (Gpa)	Kütle Yoğunluğu (Kg / m ³)	Poisson Oranı	Maksimum Yer Değiştirme (µm)	Kenar Stresi (Mpa)
		Silikon Nitrit-1	1,00	0,67	1,00	0,94	1,00	0,46
	Silikon Dioksit-1	1,00	0,67	0,46	1,00	0,68	1,00	1,00
	PoliSilikon-1	1,00	0,67	0,94	0,88	0,80	0,54	0,93
	Silikon Nitrit-2	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	0,14	0,43
	Silikon Dioksit-2	1,00	1,00	0,46	1,00	0,68	0,31	0,40
	PoliSilikon-2	1,00	1,00	0,94	0,88	0,80	0,14	0,45
	Min.Değer için Normalize TA (DR)	1,00	0,53	0,31	0,87	0,60	0,33	0,00
	Max.Değer için Normalize TA (DR)	1,00	0,93	0,94	0,98	0,96	0,93	0,93

Dil değişkenleri, karar vericiler tarafından çeşitli kriterlere göre alternatiflerin niteliklerinin önemini ve derecelendirmelerini değerlendirmek için kullanılır. Mevcut MEMS ürün tasarım sistemi seçim çalışması, performans derecelendirmeleri ve öznitelik ağırlıkları için yalnızca kesin değerlere sahip değildir.

Fikri açıklamak için, mevcut kesin / net değerleri kasıtlı olarak beş seviyeye, yani çok düşük seviye (VL/ÇD), düşük seviye (L/D), orta seviye (M/O), yüksek seviye (H/Y) ve çok yüksek seviye (VH/Ç) olarak bulanık dil değişkenlerine dönüştürüyoruz.. Çeşitli olası bulanık sayılar arasında, üçgen ve yamuk bulanık sayılar, modellemede basit oldukları ve yorumlanmaları kolay oldukları için en çok benimsenenlerdir. Şekil 5.4 bu çalışma için oluşturduğumuz üçgen bulanık sayıları göstermektedir.



Şekil 5.4 Somut olmayan faktörler için üçgen bulanık sayılar

Şekil 5.4' e göre örneğin bir kriterin sayısal derecelendirme 0.24 ise, belirsiz dilbilimsel değişkeni "D" yani "Düşük" tanımını alır. Bu dönüşüm aynı zamanda öznitelik ağırlıklarına da uygulanır. Ardından ortaya çıkan bulanık dil değişkenleri Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.4 Bulanık(Fuzzy) dil değişkenleriyle ifade edilen ölçütlerin tasarım aralığı ve sistem aralığı

SİSTEM ARALIĞI	Malzeme (Alternatif)	Boyut (µm)	Kalınlık (µm)	Young Modülü (Gpa)	Kütle Yoğunluğu (Kg / m ³)	Poisson Oranı	Maksimum Yer Değiştirme (µm)	Kenar Stresi (Mpa)
		Silikon Nitrit-1	ÇY	O	ÇY	ÇY	ÇY	D
	Silikon Dioksit-1	ÇY	O	D	ÇY	O	ÇY	ÇY
	PoliSilikon-1	ÇY	O	ÇY	Y	Y	O	ÇY
	Silikon Nitrit-2	ÇY	ÇY	ÇY	ÇY	ÇY	ÇD	D
	Silikon Dioksit-2	ÇY	ÇY	D	ÇY	O	D	D
	PoliSilikon-2	ÇY	ÇY	ÇY	Y	Y	ÇD	D
	Min.Değer için Normalize TA (DR)	ÇY	O	D	Y	O	ÇD	ÇD
	Max.Değer için Normalize TA (DR)	ÇY	ÇY	ÇY	ÇY	ÇY	ÇY	ÇY

Bulanık dil değişkeni daha sonra Tablo 5.5'de gösterildiği gibi bulanık bir üçgen üyelik işlevine/derecesi türüne dönüştürülür. Bu kavramı özetlemek gerekirse bir girdi değerinin, dilsel değişkenin bir terimine ne derecede ve ne kadar ait olduğunu gösteren değere üyelik derecesi denilmektedir.

Bu işlem sonrasında tüm alternatifler her bir kritere göre değerlendirilir. Bu değerlendirme EK-1 ve EK-2’de görüleceği üzere üçgen bulanık sayılar grafiğine göre yapılır ve her biri için tasarım aralığı ve sistem aralığının eşleştiği ortak alan hesaplanır. Böylece her bir alternatifin her bir kritere göre bilgi içeriği değeri hesaplanmış olur.

Tablo 5.5 Alternatifler için bulanık üçgen sayılarla ifade edilen tasarım aralığı ve sistem kriter aralığı

SİSTEM ARALIĞI	Malzeme (Alternatif)	Boyut (μm)	Kalınlık (μm)	Young Modülü (Gpa)	Kütle Yoğunluğu (Kg / m^3)	Poisson Oranı	Maksimum Yer Değiştirme (μm)	Kenar Stresi (Mpa)
	Silikon Nitrit-1	(0.80,1.00,1.00)	(0.40,0.55,0.70)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.20,0.35,0.50)	(0.80,1.00,1.00)
	Silikon Dioksit-1	(0.80,1.00,1.00)	(0.40,0.55,0.70)	(0.20,0.35,0.50)	(0.80,1.00,1.00)	(0.40,0.55,0.70)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)
	PoliSilikon-1	(0.80,1.00,1.00)	(0.40,0.55,0.70)	(0.80,1.00,1.00)	(0.60,0.75,0.90)	(0.60,0.75,0.90)	(0.40,0.55,0.70)	(0.80,1.00,1.00)
	Silikon Nitrit-2	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.00,0.00,0.30)	(0.20,0.35,0.50)
	Silikon Dioksit-2	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.20,0.35,0.50)	(0.80,1.00,1.00)	(0.40,0.55,0.70)	(0.20,0.35,0.50)	(0.20,0.35,0.50)
	PoliSilikon-2	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.60,0.75,0.90)	(0.60,0.75,0.90)	(0.00,0.00,0.30)	(0.20,0.35,0.50)
	Min.Değer için Normalize TA (DR)	(0.80,1.00,1.00)	(0.40,0.55,0.70)	(0.20,0.35,0.50)	(0.60,0.75,0.90)	(0.40,0.55,0.70)	(0.00,0.00,0.30)	(0.00,0.00,0.30)
	Max.Değer için Normalize TA (DR)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)	(0.80,1.00,1.00)

BÖLÜM ALTI

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Önceki bölümlerde verilen bilgi aksiyomu hesaplama formüllerine göre 6 farklı alternatif MEMS sensör membranı boyut, statik yapı, malzeme gibi farklı kriterlere göre değerlendirilmiştir. Bu kriterlerden birinin istenilen aralıkta eşleşmesi tek başına bir alternatifin en iyisi seçilmesi için yeterli olmamaktadır. Ayrıca bu kriterler arasında birbirlerine bağlı olan, birinin daha yüksek değer almasıyla bir diğerinin daha düşük değerler alan veya doğru orantı ilişkisine sahip kriterler de vardır. Örneğin; Young modülünün artması sehim yani maksimum yer değiştirme miktarını azaltmaktadır. Boyutun artması ise kalınlığı arttırmaktadır. Kalınlık artışı kenar stresini azaltırken yoğunluğu olumsuz etkilemekte ve her durumda kalınlık artışı MEMS sensörü için istenen bir durum değildir. Bu bağlamda tüm alternatifler tüm kriterlere göre değerlendirildikten sonra optimum sonucu veren alternatif seçilmelidir.

Maksimum yer değiştirme kriterin parametre değerlerinin bulunabilmesi için diğer tüm kriter parametreleri MSC MARC isimli Sonlu Elemanlar yazılımına girilmiştir ve her bir alternatif için farklı bir maksimum yer değiştirme değeri bulunmuştur. Her bir alternatifin her bir kritere göre sistem aralıkları genel malzeme özelliklerinden tespit edilmiştir ve tasarım aralıkları ise genel ihtiyaca göre şekillendirilmiştir. Örneğin genel bir kural olarak, diyaframın merkezdeki sapması (sehim/deplasman/yer değiştirme) diyafram kalınlığından büyük olmamalıdır; ve % 0.3 mertebesinde doğrusallık için diyafram kalınlığının dörtte-beşte biri ile sınırlandırılmalıdır. Bu bağlamda maksimum yer değiştirme kriter değerleri membran kalınlığını geçmeyecek aralıklarda seçilmiştir.

Tüm değerlendirme sonucunda her bir kriterin bilgi değerleri bulunmuş ve her alternatifin toplam bilgi değerleri elde edilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda tüm alternatifler için aynı değeri aldığı için boyut ölçütünün en iyi alternatifi seçme sürecini etkilemediği belirlenmiştir. Genel olarak basınç sensörünün en önemli bileşenlerinden biri olan membran bileşeninin optimum tasarım ve malzeme seçimi için sistematik ve bilimsel alt yapısı olan bir süreç yürütülmüştür. Burada müşterinin ve sisteminin gerektirdiği tasarım kombinasyonu ile tasarımcının ortaya koyduğu kombinasyonun uyumlu şekilde eşleşmesine çalışılmıştır.

Özet tablo olan Tablo 6.1’de görüleceği üzere en düşük bilgi içeriği değerine sahip alternatif, Silikon Nitrit-1 alternatifidir. Başka bir deyişle, tasarım süreci hakkında en çok şey bildiğimiz ve en az rastgele süreci içeren bu alternatiftir. Dolayısıyla en iyi alternatif, MEMS sensör membran tasarımı Silikon Nitrit-1 alternatifi malzeme olarak kullanıldığında sağlanmaktadır.

Tablo 6.1 Her bir MEMS sensör membran alternatifleri için bilgi içeriğinin hesaplanması

I_i	ALTERNATİFLER					
	Silikon Nitrit-1	Silikon Dioksit-1	Polisilikon-1	Silikon Nitrit-2	Silikon Dioksit-2	Polisilikon-2
I_{Boyut}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$I_{Kalınlık}$	1,32	1,32	1,32	0,00	0,00	0,00
$I_{Young Modülü}$	0,00	1,74	0,00	0,00	1,74	0,00
$I_{Kütle Yoğunluğu}$	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00	0,86
$I_{Poisson Oranı}$	0,00	1,32	0,29	0,00	1,32	0,29
$I_{Maks. Yer Değiştirme}$	0,78	0,00	0,29	2,18	0,78	2,18
$I_{Kenar Stresi}$	0,00	0,00	0,00	0,78	0,78	0,78
ΣI	2,10	4,38	2,76	2,96	4,61	4,12

BÖLÜM YEDİ

SONUÇ

MEMS kapasitif basınç sensörleri, endüstride basınç ölçümünün gerekli olduğu her alanda kullanılmaktadır. Bu sensörlerin Endüstri 4.0 kapsamındaki nesnelerin internetinde başarılı olması ve sorunsuzca çalışması gereklidir. Bu sensörler ayrıca kestirimci bakımın bir parçasıdır. Bu nedenle bu mikro sensörlerin en önemli bileşeni olan membranların optimum tasarımla üretilmesi, ölçüm doğruluğunu artıracak ve hizmet ömrünü uzatacaktır. Bu çalışma kapsamında farklı kriterlere göre farklı mems sensör membran alternatifleri bulanık aksiyomatik tasarım yöntemine göre sıralanarak en iyi alternatif seçilmiştir. Literatürde ilk kez, endüstri mühendisliği için birçok önemli karar verme yöntemi nanobilim ve nanomühendislik kapsamındaki mikro boyutlu MEMS sistemlerine uygulanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan aksiyomatik tasarım yöntemi sayesinde, en alternatif MEMS cihazı için üretici tasarım aralığı, müşteri sistem yelpazesi ile eşleştirilmiştir. Sonraki çalışmalarda bu çalışmadan elde edilen bilgiler sayesinde nano boyutlu NEMS sensör sistemleri veya tamamen farklı NEMS sistemleri daha detaylı tasarım kriterleri ile değerlendirilebilir. Sonuç olarak, bu çalışma günümüz endüstrisinin en önemli konularından biri olan endüstri 4.0 kavramına mikro ve nano boyutlu çok disiplinli bir katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Acar, C. ve Shkel, A.M. (2008). *MEMS Vibratory gyroscopes: structural approaches to improve robustness* (2nd ed.). Massachusetts: Springer Science.
- Amruthnath, N. ve Gupta, T.. (2018). *Fault class prediction in unsupervised learning using model-based clustering approach*.10 Haziran 2020, https://www.academia.edu/35915490/Fault_Class_Prediction_in_Unsupervised_Learning_using_Model-Based_Clustering_Approach.
- Angell J.B., Terry S.C. ve Barth PW (1983). Silicon micromechanical devices. *Scientific American*, 248 (4),44–55.
- Basınç tesislerinde hidrolik basınçın kontrol edilmesi* (2020). 10 Ağustos 2020, <https://www.turck.com.tr/tr/controlling-hydraulic-pressure-in-pressing-plants-33614.php>.
- Bergveld, P. (1985). The impact of MOSFET-based sensor. *Sensors and Actuators*, 8 (2),109–127.
- Becker, J. (2002). Tire Pressure Monitoring Systems — the New MEMS Based Safety Issue. In S. Krueger., W. Gessner, (Ed.) *Advanced Microsystems for Automotive Applications Yearbook* (2nd ed.) (243-250). Berlin: Springer.
- Cakmakci M. (2019). Interaction in project management approach within Industry 4.0. In Trojanowska J., Ciszak O., Machado J., Pavlenko I. (Ed.). *Advances in Manufacturing II*. (4th ed.) (176-189). Poznan: Springer.
- Clarke, P. (2016). *Smart MEMS microphones market emerges*. 14 Haziran 2019, <https://www.eenewsanalog.com/news/smart-mems-microphones-market-emerges>.

- Cornelius, T. L. (2003). *Multimems microsystems manufacturing cluster multimems process design*. 5 Temmuz 2020, <https://www.sensor.com/>.
- Erez A.S., Cakmakci M. ve Imrenci R. (2020). The Problem of Selection with the Fuzzy Axiomatic Design of MEMS Based Sensors in Industry 4.0 Predictive Maintenance Process. In Kahraman C., Cevik Onar S., Oztaysi B., Sari I., Cebi S., Tolga A. (Ed.). *Intelligent and Fuzzy Techniques: Smart and Innovative Solutions*.(2nd ed.) (195-203). Poland: Springer.
- Gabriel, K., Jarvis, J. ve Trimmer, W. (1988). Small machines, large opportunities. *Report of the workshop on microelectromechanical systems research*. (2nd ed.) (1-33). New Jersey: AT&T Bell Laboratories.
- Güngör, F. (2016). Selection of seal material by axiomatic design method. *Journal of Science and Engineering*, 4 (1), 1-10.
- Hendricks, Drew.(2015). *The trouble with the Internet of Things*. 10 Ağustos 2015, <https://data.london.gov.uk/blog/the-trouble-with-the-internet-of-things/>.
- Jaeger, R.C. (1988). *Introduction to Microelectronics Fabrication* (5th ed.). Alabama: Addison-Wesley.
- Johnson, R.C. (2007). *There's more to MEMS than meets the iPhone*. 14 Haziran 2019, <https://www.eetimes.com/theres-more-to-mems-than-meets-the-iphone/>.
- Kattabomman, N., Sarath, S. ve Kamaragiri, R. (2012). *VLSI layout based design optimization of a piezoresistive MEMS pressure sensors using COMSOL*. 17 Temmuz 2020, <https://www.comsol.es/paper/vlsi-layout-based-design-optimization-of-a-piezore-sistive-mems-pressure-sensors>.

- Kulak, O., ve Kahraman, C.,(2005). Fuzzy multi-attribute selection among transportation companies using axiomatic design and analytic hierarchy process. *Information Sciences*, 170 (7), 191–210.
- Kumar, A., Sharma, A., Kumar, R., Vaish, R., Chauhan, V. ve Bowen, C. R. (2015). Piezoelectric materials selection for sensor applications using finite element and multiple attribute decision-making approaches. *Journal Of Advanced Dielectrics*, 5,1-8.
- Lou, L., Zhang, S., Park, W., Tsai, J M., Kwong, D. ve Lee, C.(2012). Optimization of NEMS pressure sensors with a multilayered diaphragm using silicon nanowires as piezoresistive sensing elements. *Journal Of Micromechanics And Microengineering*, 22, 1-15.
- MEMS sensor and Mems Sesnro working principle*. 10 Mayıs 2020, <https://www.elprocus.com/mems-sensor-working-and-its-applications/>.
- Mobley, R. Keith. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). New York: Butterworth-Heinemann.
- Munro, D. (2019). *DIY MEMS (2nd ed.)*. Basel : Springer.
- Ozel, B ., ve Ozyörük, B. (2006). Supplier selection with fuzzy axiomatic design. *Gazi University Journal of Faculty of Engineering*, 22 (3), 415-423.
- Rai-Choudhury, P. (Ed.). (2000). *MEMS and MOEMS Technology and applications*. (7th ed.). Washington: SPIE Press.
- Shaby, S.Maflin., Premi, M.S.G. ve Martin, B. (2014). Enhancing the performance of MEMS Piezoresistive Pressure Sensor using Germanium Nanowire. *Procedia Materials Science*, 10, 254-262.

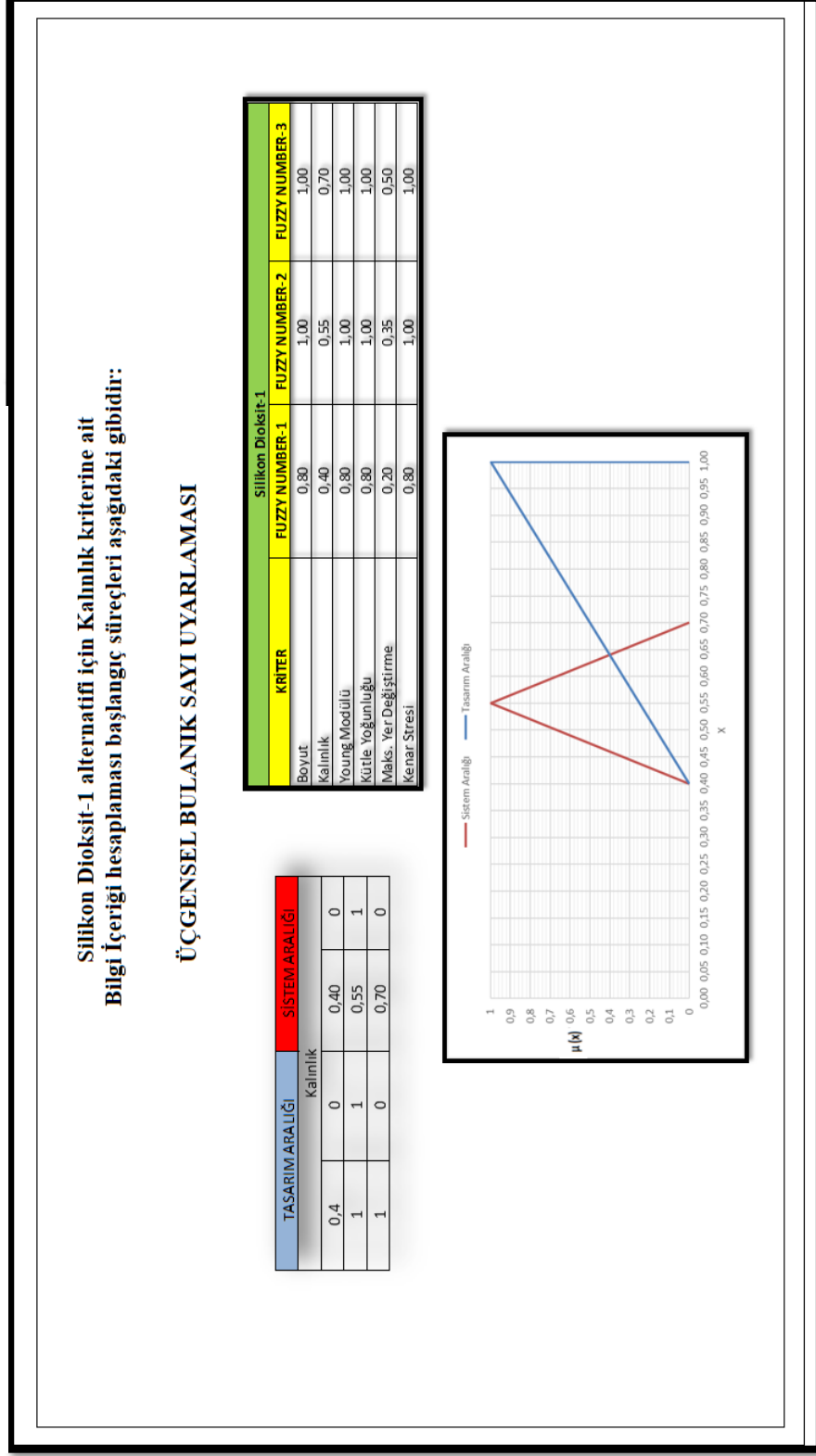
Suh, N.P. (2001). *Axiomatic design—advances and applications* (2nd ed.). New York: Oxford University Press.

Saravanan, V. K. (2016). Finite Element Analysis of membranes for MEMS capacitive pressure sensors. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5, 330-336.



EKLER

EK-1:Örnek bulanık sayılarla bilgi içeriği hesaplama gösterimi 1. Aşama



**Silikon Dioksit-1 alternatifi için Kalınlık kriterine ait
Bilgi İçeriği hesaplaması formül uygulaması aşağıdaki gibidir:**

2-B noktasının koordinatları aşağıdaki doğrusal denklemlerden elde edilir.

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{x - x_1}$$

3-Sarı ile gösterilen ortak üçgenel alan aşağıdaki denklemle elde edilir.

$$\begin{aligned} (ABC) &= \frac{1}{2} [(x_1 * y_2 + x_2 * y_3 + x_3 * y_1) - (y_1 * x_2 + y_2 * x_3 + y_3 * x_1)] \\ &= 0,5 * [(0,40 * 0,40 + 0,64 * 0,00 + 0,70 * 0,00) - (0,00 * 0,64 + 0,40 * 0,70 + 0,00 * 0,40)] \\ &= 0,060 \end{aligned}$$

4-Sistem aralığının üçgenel bulanık alanı aşağıdaki denklemle elde edilir.

$$\bar{ÜBA} = \frac{1}{2} * \{0,70 - 0,40\}$$

$$= 0,15$$

5-Son olarak bilgi içeriği aşağıdaki denklemlerden elde edilir. Tüm alternatiflerin her bir kriteri için bu işlem tekrarlanır.

$$I_i = \log_2 \left(\frac{\text{Sistem Aralığının Üçgenel Bulanık Alanı}}{\text{Ortak Alan}} \right) \quad I_i = \log_2 \left(\frac{0,15}{0,060} \right)$$

$$I_i = 1,32$$

1- Kırmızı ile çizilmiş üçgen alan, uzman / tasarımcı tarafından belirlenen tasarım aralığını gösterir.

