

Melik Dölen

Y. Doçent Dr.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Makina Mühendisliği Bölümü
06531 ANKARA

Halit Kaplan

Dr. Mak. Yük. Müh.

TÜBİTAK

Atatürk Bulvarı, No. 221
Kavaklıdere, 06100 ANKARA

Mikro-Elektro-Mekanik Sistemlerin Tasarım ve Ölçeklendirme İlkeleri

Bu makale, mikro-elektro-mekanik sistemlerin tasarımında (büyük ölçekli sistemlerden farklı olarak) öne çıkan önemli ilkeler üzerinde durulmaktadır. Buna göre, mikro sistemlerin makro sistemlere göre bazı avantajlarından kısaca bahsedilerek, mikro sistemlerin tasarımı sırasında göz önünde bulundurulması gereken faktörlere değinilecektir. Ayrıca, mikro ve makro sistemlerde öne çıkan farklı fiziksel büyüklükler ve tasarımcının takip edeceği tasarım akış yolu ve tasarım için kullanılabilen bazı sayısal araçlara da bu makalede yer verilmektedir.

GİRİŞ

Bir mekanik sistemi mikro ölçekli olarak küçültmenin birçok yararı vardır. Öncelikle böyle bir sistemde, hacimle ilgili kuvvetler (ağırlık/atalet) önemini yitirir. Bunun doğal sonucuysa, çok hızlı mekanik sistemlerin mikro ölçekli dünyada gerçekleştirilebileceğidir. Böylece anlık hareket ettirilip/durdurulabilen mekanizmalardan; çok büyük ivmeli hareketlere dayanabilecek duyuçulara kadar, birçok sistemi (mikro-ölçekli dünyada) hayata geçirmek mümkün olur. Ayrıca mikro-mekanik sistemler büyük ölçekli makina sistemlerine göre daha az yer kaplayıp, daha az güç harcarlar. Uygun seri-üretim ("mass production") teknikleriyle, bu tip sistemlerin çok ucuza da imal edilebilecekleri önemli bir gerçektir.

Aslında mikro-mekanik sistemler kendi başlarına önemli uygulama alanları bulsa da, MEMS teknolojisinin en temel amacı bu tip sistemleri mikro-elektronik teknolojiyle bütünleştirerek, aynı yapı (kırımcık) altında uygun bir işlevi yerine getirecek tümleşik sistemi yaratmaktır. Günümüzde olgunlaşma aşamasına gelen mikro-elektronik teknolojisinin üretim teknikleriyle, hiç şüphesiz minyatürleştirilmiş mekanik, elektro-mekanik, ve optik sistemlerin üretilmesi mümkündür. En geniş anlamıyla, bu üç farklı sistemi bir araya getiren bilim dalına mikro-opto-elektro-mekanik sistem (MOEMS) teknolojisi adı da verilse; teknik kaynaklarda MEMS, MOEMS'i de kapsayan bir kavram olarak kullanılmaktadır.

MEMS'in mikro-elektronik teknolojiyle önemli benzerlikleri vardır. MEMS çoğunlukla ana malzeme olarak silisyumu kullanmasının yanında;

foto-litografi, katkılama, kimyasal buharla biriktirme vs. gibi mikro-elektronik teknolojisinin temel üretim tekniklerinden yararlanır. Bunu en önemli nedeni, hali hazırdaki mikro-elektronik malzeme ve üretim teknolojilerinin kolaylıkla bu yeni alana uyarlanabilmesidir. Bunun dışında, MEMS ile mikro-elektronik teknolojisi arasında belirgin farklılıklar da vardır. Öncelikle, mikro-elektronik cihazlar çoğunlukla iki boyutludur ve sadece işaret/bilgi (elektron akışı) temelli çalışırlar. MEMS ise genelde üç boyutlu bir yapıya sahiptir ve çok değişik fiziksel ortamlarla (akışkanlar, sıcaklık, elektro-manyetik dalgalar vs.) etkileşim halindedir. Ayrıca üç boyutlu yapısı gereği MEMS, mikro-elektronikte kullanılmayan bazı yeni malzeme ve üretim teknolojilerini de beraberinde getirir. Biyolojik sistemlerle MEMS arasında basit bir benzerlik (analoji) kurulursa, MEMS'in bünyesinde yer alan mikro-elektronik sistem bu yapının beynini, elektro-mekanik donanımlarsa onun duyu (ve kas) sistemini oluşturur.

MEMS'in günümüzde en yaygın uygulama alanı; hiç şüphesiz ki, duyuç ("sensor") sistemleriyle bu sistemlerin sağladığı verileri (işaretleri) işleyerek, yararlı sonuçlar üreten tümleşik sistemlerdir. Son zamanlarda otomotiv sektörü için üretilen ve kaza anında hava yastığını devreye sokan sistem, bunun en güzel örneğidir. Bu kırımcık (Analog Devices ADXLx50); bir ivme ölçer ve belirli bir yavaşlama (eşik) değeri için hava yastığındaki ateşlemeyi tetikleyecek bir mikro-elektronik devreden oluşur [1]. Böylesi tümleşik sistemlerin yukarıda sözü edilen olumlu yanlarının yanında, güvenilirliği de oldukça fazladır. Şöyle ki titreşim, dinamik kuvvetler ve çeşitli ısı etkiler nedeniyle; duyuç ve onun ölçümlerini değerlendiren (elektriksel) kontrol/denetim sistemlerinde (örneğin elektriksel motor sürücülerini)

ortaya çıkan arızaların temel kaynağı, duyucuyu sisteme bağlayan iletim hatlarındaki veya bağlantı elemanlarındaki kopukluklardır [2]. Uygun bir paket altında toplanan böyle MEMS uygulamaları, bu tür sorunları ortadan kaldırır. Günümüzde MEMS aslında birçok değişik araştırma alanına girmiştir. Tablo 1, kısaca MEMS cihazların kullanıldığı bazı uygulama alanlarını göstermektedir.

Tablo 1 Günümüzdeki MEMS uygulama alanları.

| Alan | Uygulama |
|----------------------------|---|
| Akışkanlar Mekaniği | Kayma gerilmesi ölçümü, düşük Reynolds sayılı akışkanlar mekaniği uygulamaları |
| Bilgisayar | Optik esaslı bilgi depolama ve disk sürücü teknolojisi, mürekkep püskürtmeli yazıcılar |
| Biyoloji ve Tıp | DNA analizi, mikro-cerahi aletler, kimyasal duyucular, sinirsel elektrodlar/sondalar |
| Elektronik | Cihazlar ve röleler |
| Fizik | Gelişmiş mikroskop uygulamaları, mikro ölçekli sıcaklık ölçüm uygulamaları |
| Haberleşme | Radyo frekansı devre ve filtre uygulamaları |
| Havacılık ve Uzay | Sürüklenme direncinin kontrolü, minyatür hava araçları, mikro-uydular, uydular için az yer kaplayan cihaz uygulamaları, radyasyon ölçüm |
| Optik | Tümleşik optik sistemler, optik anahtarlama, sayısal ışık işleme, düz panel görüntüleme |
| Taşıt Tekniği | Basınç/sıcaklık/ivme ölçümü, taşıt güdüm teknolojileri |

MEMS'in kurucusu olarak çoğunlukla ünlü fizikçi Richard Feynman anılır. 1959 yılında Feynman, malzemeleri buharlaştırarak veya biriktirerek son derece küçük cihazların üretilebileceği fikrini ortaya atmıştır [3]. Feynman önemli konuşmasında; biyolojik sistemleri örnek göstererek, malzemelerin önce kimyasal olarak sentezini yapıp, ardından da onları fiziksel olarak atomik mertebede bir araya getirerek küçük makineler üretilmesi önerisinde bulunmuştur. Bu düşüncenin sınırlı bir çerçevede de olsa hayata geçirilmesi altmışlı yılların ortalarını bulmuştur. Mikro cihazların o zamanki üretim teknikleri, gelişmekte olan tümleşik devre teknolojisinin doğal bir uzantısıdır. Mikro röleler, basınç duyucuları ve debi ölçerler bu yıllarda üretilmeye başlanmış mikro-ölçekli mekanik sistemlere örnektir. Yetmişli yıllar beraber, tümleşik devre teknolojilerinden uyarlanan üretim yöntemleri daha da gelişim göstermiştir. Katkılama yardımıyla kazıntı/aşındırma ("etching") durdurma teknikleri sayesinde birçok mikro ölçekli duyucu (basınç,

sıcaklık ve görüntü) başarıyla üretilir hale gelmiştir. Seksenli yılların sonlarına doğru yeni yüzey mikro-ışılama ("surface micromachining") teknikleri ortaya çıkmış [4] ve sonucunda rezonanslı duyucular ve mikro eyleyiciler (tahrik elemanları, motorlar) gibi sistemler seri olarak üretilme aşamasına gelmiştir. Yüzey mikro-ışılama tekniklerinin en önemli özelliği şudur: Bu teknik yardımıyla; bağlama elemanları, yataklar, esnek destekleme parçaları, vs içeren mikro-mekanik sistemler doğrudan doğruya silisyum plaka/pul üzerine inşa edilebilmektedir. Böylece, çok masraf ve zaman gerektiren makina montaj işlemi ortadan kaldırılmaktadır. Doksanlı yılların başıyla beraber, yüksek enerjili X-ışını litografisine bağlı teknikler (LIGA) gelişim göstermeye başlamış [5], nispeten yüksek derinliğe ("aspect ratio") sahip mikro-mekanik sistem ve cihazların üretilebilmesi mümkün olmuştur. İlerleyen yıllar, yeni LIGA tekniklerini (gecici katmanlı LIGA teknikleri) beraberinde getirmiş [6]; desteklenmemiş mikro-mekanik yapıların ve elemanlarının üretilmesi imkan dahilinde olmuştur.

MİKRO-MEKANİK SİSTEM TASARIMI VE ÖLÇEKLENDİRME

Mikro-mekanizmaların tasarımı, yeni felsefeleri ve yaklaşımları da beraberinde getirir. Bu tip sistemlerin genel topolojisi, yapısal bileşenleri, malzemeleri, tahrik (motor) elemanları (eyleyiciler) ve kontrol biçimi; sistemin çalıştığı mikro-ortam ve bu ortamla uyumlu ölçeklendirme kanunlarıyla belirlenir.

Daha önce de irdelendiği gibi; geleneksel makina tasarımında en önemli unsurlar kütle/atalet, sönüm, sistem rijitliği (katılığı), ve sistemin birinci dereceden dinamik yanıtıdır. Ancak, mikro-ölçekte (makina sisteminin) yüzey alanının hacmine oranı oldukça arttığından; bu gibi etmenler önemini yitirmektedir. Bunlar yerine sürtünme, yüzey gerilmesi, adhezyon, ve diğer sınır kuvvetleri gibi ikincil etkiler makina tasarımı üzerindeki baskın unsurlar olmaktadır.

Mikro-mekanik sistemleri tasarlayabilmek için öncelikle mikro ortamda kuvvet, ivme, güç gibi önemli fiziksel büyüklüklerin nasıl ölçeklendirildiğini kavramak gerekir. Ölçeklendirme kurallarını açıklayabilmek için; (x, y, z) boyutlarına sahip bir prizmatik bir parçanın minyatürleştirilerek (x',y',z') boyutlarına getirildiği varsayalım:

$$\frac{x'}{x} = \frac{y'}{y} = \frac{z'}{z} = \sigma \quad (1)$$

Burada σ (izometrik) ölçek katsayısıdır ($0 < \sigma < 1$). Yoğunluğun (ρ) sistemin boyutlarına bağlı bir fiziksel özellik olmadığı düşünülürse, kütleler (m) için,

$$\frac{m'}{m} = \frac{\rho x' y' z'}{\rho x y z} = \frac{V'}{V} = \sigma^3 \quad (2)$$

yazılabilir. Burada V hacmi (oylumu) belirtirken (') sembolü küçültülmüş sisteme ait fiziksel büyüklükleri ifade etmektedir. Bu basit mekanik sisteme etkiyen kuvvetin (F)

$$\frac{F'}{F} = \sigma^N \quad (3)$$

şeklinde ölçeklendirildiği düşünülün. Burada, N çoğunlukla {1, 2, 3, 4} değerlerinden birini alabilen bir katsayıdır. Makro ortamda olduğu gibi; mikro-ölçekli ortamda da kuvvetler üç temel fiziksel yolla oluşturulabilir: **i.** elektrostatik; **ii.** manyetik; **iii.** hidrolik basınç veya hava basıncı. Mekanik sisteminde faydalanan temel fiziksel mekanizmaya ve doğal olarak bunun sistem içinde kullanma koşullarına bağlı olarak; (3)'teki N katsayısı seçilir. Örnek olarak, Şekil 16'daki elektromanyetik sistem göz önüne alınsın. Burada hareketli parçaya uygulanan manyetik (relüktans) kuvvet (şiddeti)

$$F = 0.25n^2\mu_0(h/\delta)i^2 \quad (4)$$

olarak verilebilir [7]. Bu ifadede, μ_0 serbest boşluğun manyetik geçirgenlik katsayısıdır ve $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] olarak alınabilir. (4)'teki diğer fiziksel büyüklükler şekil üzerinde gösterilmiştir. Sarımdan geçen akım için

$$i = JA \quad (5)$$

yazılabilir. Burada J akım yoğunluğunu, A da akımı geçiren iletkenin kesit alanını belirtmektedir. İsoemetrik olarak küçültülen bir sistem için,

$$\frac{F'}{F} = \frac{0.25n^2\mu_0(h/\delta)J^2(A')^2}{0.25n^2\mu_0(h/\delta)J^2(A)^2} = \frac{(A')^2}{(A)^2} = (\sigma^A)^2 = \sigma^A \quad (6)$$

oranı elde edilir. Bu ölçeklendirme J akım yoğunluğunun sabit kalacağı gibi gerçekçi bir varsayımına dayanmaktadır. Ancak bu varsayımla elde edilen oran, oldukça zayıf bir manyetik kuvvetin küçültülmüş sistemde oluşturulabileceğini işaret etmektedir. [8]'de akım yoğunluğunun işletim koşullarına bağlı olarak; farklı seçildiği durumlar incelenmiş, kuvvetin σ^2 , σ^3 gibi ölçeklendirilebileceği gösterilmiştir. Aslında, yukarıdaki gibi bir elektromanyetik sistemde sarım sayısını da (n') değiştirerek de MMF'i (magnetomotive kuvvet) arttırmak mümkündür. Böylece daha yüksek mikro-sistem kuvvetlerinin elde edilebileceği düşünülebilir. Ancak bu, çekirdeği manyetik doygunluğa ("saturation") ulaştırabileceği gibi, sarım sayısının doğurduğu önemli

üretim ve işletme güçlükleri de ortaya çıkarabilir. Elektrostatik kuvvetler mikro-ölçekte daha avantajlı olarak gözükmektedir. Elektrostatik kuvvetlerin ölçeklendirilmesi çoğunlukla elektriksel alanın boyuta bağlı olarak değişimine bağlıdır. Elektrik alan şiddetinin ($E'/E = 1$) sabit kaldığı düşünülürse, $F'/F = \sigma^2$ olduğu gösterilebilir [8]. Benzer olarak, mikro sistemde elektriksel alan ($E'/E = \sigma^{0.5}$) şeklinde arttırılırsa, $F'/F = \sigma$ gibi çok iyi bir kuvvet ölçeklendirmesi elde edilir. Manyetik alan şiddetinde olduğu gibi, elektriksel alan şiddetini de arttırmanın belirli fiziksel sınırları vardır. Genel olarak, elektriksel alan şiddeti çok arttırıldığında kullanılan yalıtkanların bozulma problemi ortaya çıkar. Ayrıca elektriksel alanın uygulandığı aralık eğer çok kısalsın, elektriksel alanın çökeceği de bilinen bir gerçektir.

Hidrolik (veya pnömatik) kuvvetler, basınçın bir alan üzerine etkisiyle oluştuğundan; ($F'/F = \sigma^2$) gibi iyi bir kuvvet ölçeklendirmesine yol açarlar. Biyolojik sistemlerdeki kas kuvvetleri de, kasın kesit alanıyla orantılıdır. Dolayısıyla, hidrolik kuvvetlere benzer bir kuvvet ölçeklendirmesini beraberinde getirir.

Kuvvet ölçeklendirilmesi tamamlandıktan sonra, ivmelerin oranı Newton'un ikinci hareket yasası ($F = ma$) yardımıyla hesaplanabilir:

$$\frac{a'}{a} = \frac{F'/m'}{F/m} = \frac{F' m}{F m'} = \sigma^N \sigma^{-3} = \sigma^{N-3} \quad (7)$$

Benzer olarak, mekanizmayı (sabit ivmeli olarak) bir noktadan diğerine ulaştırma zamanı, $L = (1/2)at^2$ (L: ulaşım mesafesi) bağıntısı kullanılarak bulunabilir:

$$\frac{L'}{L} = \sigma = \frac{(1/2)a'(t')^2}{(1/2)a(t)^2} = \sigma^{N-3} \left(\frac{t'}{t}\right)^2 \quad (8)$$

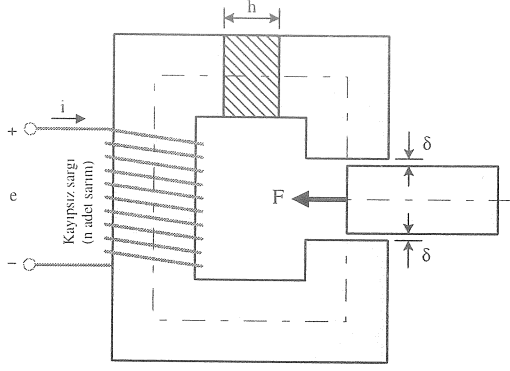
$$\frac{t'}{t} = \sigma^{2-N/2} \quad (9)$$

Son olarak, öz-güç (birim hacim için oluşturulan ortalama güç) bütün bu sözü edilen bağıntılar kullanılarak saptanır:

$$p = \frac{(FL/t)}{V} \quad (10)$$

$$\frac{p'}{p} = \frac{F'L' V t}{FL V' t'} = \sigma^{3N/2-4} \quad (11)$$

Bu mantığı kullanarak, diğer fiziksel büyüklüklerin de ölçeklendirilmesi yapılabilir [9]. Görüldüğü üzere, fiziksel sistem küçüldükçe, sistemin davranışı köklü biçimde değişmekte ve makro ortam için geliştirilen seziler geçerliliğini büyük ölçüde yitirir.



Şekil 1 Ölçeklendirme örneğindeki sistem [7].

Mikro-sistemlerin tasarımı sırasında ortaya çıkan bir başka önemli unsur da, beraber çalışması gereken mikro-mekanik sistem parçalarının toleranslarıyla ilgilidir. Her ne kadar MEMS teknolojisinde mikro-sistemlerin karakteristik boyutları mikronlarla ifade edilse de, izometrik olarak küçültülmüş bir sistemde orijinal toleransların aynısının tutturulması günümüz teknolojisiyle mümkün olmamaktadır. Hatta, günümüzün büyük hassasiyetle üretilmiş mikro-sistemleri, ölçeklendirilmiş tolerans açısından incelendiğinde, 18. yüzyılda kullanılan mekanizmalarla benzer toleranslara sahip olduğu görülür [9]. Bu nedenle, MEMS'leri tasarlarken alışlagelmiş tasarım uygulamalarının dışına çıkarak, mikro-ölçekli dünyanın gereksinimlerine uygun yenilikçi tasarım ilkelerinin benimsenmesi gerekir.

Kısacası, gelecekteki mikro-sistemlerin günümüzdeki makinalardan çok farklı olacağı ve biyolojik sistemlerle önemli benzerliklerinin olabileceği düşünülmektedir. Yeni tasarım kavramlarının geliştirilmesi, organik dünyayla ilgili gözlem ve araştırmalara bağlı olacağı açıktır. Mikro-sistemlerin işletim kurallarını saptamak amacıyla; uygun boyutsuz fiziksel parametre grupları tanımlayarak, bu sistemlerin makro modelleri üzerinde deneysel çalışmalar yürütmek gerekecektir.

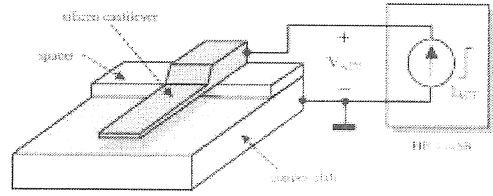
MİKRO-ANAHTAR TASARIMI

Bu bölümde MEMS tasarım ilkelerini tanıtmak amacıyla, elektro-statik olarak açılıp kapanan bir mikro-anahtar sisteminin ön tasarımı bu bölümde detaylandırılacaktır.

Elektrostatik olarak tahrik edilen mikro anahtar sistemleri, röle sistemlerinin sahip olduğu bütün olumlu elektriksel özellikleri bünyesinde barındırır. Bunun ötesinde, bu sistemler tıpkı katı hâl elektronik anahtarlar elemanları gibi (MOSFET, JFET, BJT, Thyristor, vs.) yüksek hızlarda açılıp kapatılabildiklerinden; bazı

uygulamalarda mikro-anahtarlar bu tip elemanlara rakip olabilmektedir [10].

Şekil 2'de böyle bir sistem gösterilmektedir. Burada konsol kırıyla tabandaki iletken plaka arasında büyük bir potansiyel fark (gerilim) uygulandığında, kırı üzerinde oluşan elektrostatik kuvvetler kırı aşağıya doğru eğerek, kırı ucuyla onun karşısındaki (elektriksel olarak yalıtılmış) temas noktası arasında bir fiziksel/elektriksel bağlantı kurar. Benzer olarak, potansiyel fark sıfıra düşürüldüğünde, kırı eski haline geri döner. Böylece temas noktaları arasında boşluk nedeniyle, anahtarın açık konumundaki direnci çok yüksek değerlere ulaşır ($\sim 10^{12}\Omega$ civarında). Diğer bölümlerde mikro-kırı tasarım problemi tanıtarak bu sistemlerin analizi hem sayısal hem de analitik olarak gerçekleştirilecektir.



Şekil 2 Mikro konsol kırı [10].

A. Sayısal Çözüm

Şekil 3, bu makalede incelenecek olan mikro-kırı (anahtar) sistemini göstermektedir. Bu sistemle ilgili önemli parametreler yine şekil üzerinde verilmiştir. Söz konusu bu sistemin quasi-statik denge denklemi

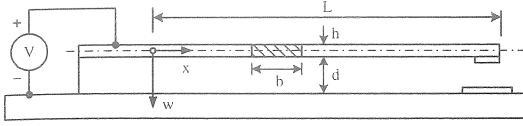
$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = q_w + q_e \quad (12)$$

şekilde yazılabilir. Burada q_w kırı birim ağırlığını, q_e ise elektrostatik alanın kırı üzerinde meydana getirdiği yayılı yükü temsil etmektedir:

$$q_w = \rho g b h \quad (13a)$$

$$q_e = \frac{\epsilon_0 V^2 b}{2(d-w)^2} = \frac{\epsilon_0 V^2 b}{2d^2} \cdot \frac{1}{(1-w/d)^2} \quad (13b)$$

Burada V uygulanan gerilimin şiddetini [V]; ρ kırı malzemesinin yoğunluğunu [kg/m^3]; ϵ_0 ise boşluğun elektriksel geçirgenliğini ("permittivity") ifade etmektedir. Bu makalede $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$ [F/m] olarak alınacaktır. Dikkat edilirse (13b)'nin doğrusal (linear) bir ifade olmadığı görülür. Bu durum (12)'nin analitik çözümünün (adî fonksiyonlar cinsinden) bulunmasını oldukça zorlaştırır. Dolayısıyla, kırı çökme analizini sayısal olarak gerçekleştirmek, ilk aşamada elverişli olacaktır.



Şekil 3 Elektrostatik olarak tahrik edilen ve anahtar görevi gören bir mikro konsol kiriş.

Daha önce bahsedildiği gibi, mikro-elektromekanik sistemlerde ağırlık ve atalet kuvvetleri, diğerlerinin yanında çok küçük kaldığından ($q_w \ll q_e$), onların ihmal edilmesi mümkündür. Dolayısıyla, $q_w \approx 0$ alınırsa, sistemin diferansiyel denklemi

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{\epsilon_0 V^2 b}{2d^2} \cdot \frac{1}{(1 - w/d)^2} \quad (14)$$

halini alır. Yukarıdaki denklem düzenlenip, boyutsuz büyüklükler cinsinden ifade edilirse

$$\frac{d^4 \bar{w}}{d\bar{x}^4} = \frac{\alpha}{(1 - \bar{w})^2} \quad (15)$$

bulunur. Burada $\bar{w} \equiv w/d$ ve $\bar{x} \equiv x/L$ olarak tanımlanmıştır. Bu tür MEMS uygulamalarında, kirişin kesidi hep dikdörtgen olduğundan $I = bh^3/12$ alınabilir. Böylece (15)'teki boyutsuz parametre

$$\alpha \equiv \frac{\epsilon_0 V^2 b L^4}{2EI d^3} = \frac{6\epsilon_0 V^2 L^4}{E(hd)^3} \quad (16)$$

şeklini alır. (15) (doğrusal olmayan) adî bir diferansiyel denklem olup; **ilk şartlar** bilindiği takdirde, (16)'nın sayısal çözümü Euler, Runge-Kutta, Adams vs. gibi çok iyi bilinen integrasyon teknikleriyle kolaylıkla bulunabilir [11]. Ancak, bu problem için denklemin ilk şartlarından bir kısmı bilinmemektedir. Şöyle ki konsol kirişin bağlantı noktasında ($x = 0$) çökme [$w(0) = 0$] ve dönme [$w'(0) = 0$] koşulları bilinmesine rağmen, diğerleri belirsizdir. Yani, bu noktadaki eğilme momenti [$M(0) = EIw''(0) \neq 0$] ile kesme kuvveti [$F(0) = EIw'''(0) \neq 0$] bilinmemektedir. Buna karşın, elde edilecek sayısal çözüm, kirişin serbest ucundaki ($x = L$) bir takım sınır şartlarını gerçeklemek durumundadır. Yani bu noktada [$M(L) = EIw''(L) = 0$] ve [$F(L) = EIw'''(L) = 0$] koşulları sağlanmalıdır.

Sınır değer problemi olarak bilinen bu konuyla ilgili birçok "ad hoc" çözüm yöntemine teknik kaynaklarda rastlanmaktadır [11, 12]. Bu makalede *benzetilmiş soğutma* ("Simulated Annealing")

teknikğine dayalı bir stokastik çözüm ele alınacaktır [13].

Sınır değer probleminin çözümüne yönelik olarak, bir hata (sınır şartlarından sapma) fonksiyonu öncelikle tanımlanmıştır:

$$U(\alpha, m_0, f_0) = [\bar{w}'(\bar{x}=1)]^2 + [\bar{w}'''(\bar{x}=1)]^2 \quad (17)$$

Burada,

$$m_0 \equiv \bar{w}'(\bar{x}=0) \quad (18a)$$

$$f_0 \equiv \bar{w}'''(\bar{x}=0) \quad (18b)$$

problemin ilk şartları yansıtmakta olup, bunlara serbest parametre gözüyle bakılmalıdır. Sabit bir α değeri için, verilen ilk şartlar kullanılarak (15) denklemi (değişken adımlı) 4. mertebeden Runge-Kutta teknikleriyle çözülür. (17) denklemiyle istenen sınır şartlarından sapma hesaplanabilir. Böylece "benzetilmiş soğutma" teknikğinde kullanılan soğuma olasılığı bu değer yardımıyla belirlenir. Şekil 4, çeşitli α faktörlerine karşılık gelen sınır değerlerini (serbest uçta çökme: w_{\max}/d , m_0 ve f_0) göstermektedir.

Burada önemle vurgulanması gereken nokta, mikro-kirişin kararlı çalışma bölgesidir. Şekil 5 (17) denklemiyle ifade edilen hatanın (U) α 'ya bağlı değişimini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere belirli bir α değerinin üzerinde ($\alpha^* \approx 1.7$), mikro-kirişin serbest uçunda istenen sınır koşullarının hiçbir zaman sağlanmadığı görülür. Bunun temel nedeni, mikro-kirişin ucundaki çökmenin kararsız hale gelmesi ve kirişin artık statik denge konumunu koruyamamasıdır. Bu olayı anlamak için, ilgili mikro-kirişe uygulanan gerilimin (V) zaman içinde yavaşça artırıldığı düşünölsün. Belirli bir kritik gerilim değerine (V^*) kadar kiriş ucunun artan gerilime bağlı olarak çöktüğü görülür. Gerilim bu kritik değer üstüne çıkarsa, kiriş ucunun anî olarak en aşağıya kadar indiği gözlemlenir [14].

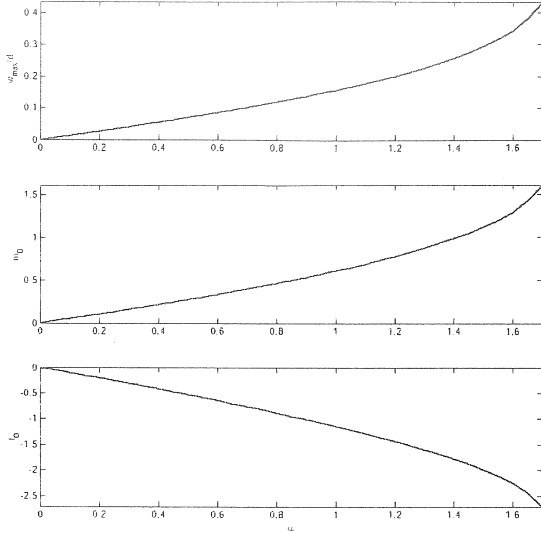
Kovacs [14], Petersen [15]'in deneysel sonuçlarına dayanarak; yukarıda sözü edilen kritik gerilim değerini

$$V^* \approx \sqrt{\frac{18EI d^3}{5\epsilon_0 L^4 b}} \quad (19)$$

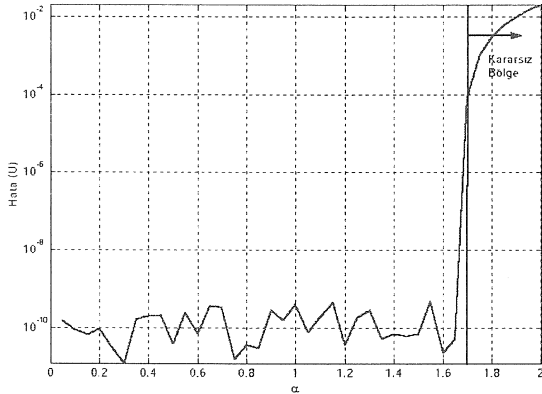
şeklinde vermektedir. Bu ifade (16)'da yerine konursa, $\alpha^* \approx 1.8$ olarak bulunur. Bu sonuç da ilgili sayısal çözümle uyumludur.

B. Analitik Çözüm

Bir önceki bölümde, mikro-kirişin çökme analizi sayısal olarak gerçekleştirilmişti. Bu bölümde sistemin boyutlandırılmasında kullanı-lacak ve A'da verilmiş sonuçlarla uyumlu bir basit analitik çözüm geliştirilecektir.



Şekil 4 Değişik α faktörleri için hesaplanmış sınır değerleri.



Şekil 5 Sınır koşullarını sağlama hatası.

Mikro-kiriş için analitik bir çözüm elde etmek için, diferansiyel denklem (14)'de yer alan ve doğrusal olmayan (13b) teriminden kurtulmak gerekmektedir. Bu ifade ($w = 0$ etrafında) Taylor serisine açılıp, "doğrusallaştırılması;" (14)'ün sabit katsayılı doğrusal bir diferansiyel denklem olarak ele alınarak çözülmesine imkân sağlayacaktır:

$$\frac{1}{(1-w/d)^2} = 1 + 2\frac{w}{d} + 3\left(\frac{w}{d}\right)^2 + \dots \approx 1 + 2\frac{w}{d} \quad (20)$$

Daha önce bahsedildiği gibi, ağırlık kuvveti elektro-statik kuvvet yanında ihmal edilirse, diferansiyel denklem (14)

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{\epsilon_0 V^2 b}{d^3} w = \frac{\epsilon_0 V^2 b}{2d^2} \quad (21)$$

halini alır. Bu diferansiyel denklemin çözüm kabulü ise

$$w(x) = C_0 + C_1 e^{\beta x} + C_2 e^{-\beta x} + C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x \quad (22)$$

olarak yazılabilir. Burada,

$$\beta \equiv \sqrt[4]{\frac{\epsilon_0 V^2 b}{EI d^3}} = \sqrt[4]{\frac{12 \epsilon_0 V^2}{E \cdot (dh)^3}} \quad (23a)$$

$$C_0 = -\frac{d}{2} \quad (23b)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Diğer sabitlerin bulunması için sistemin sınır şartları göz önüne alınır:

Konsol kirişin bağlantı noktası ($x = 0$):

$$w(0) = 0 \quad (24a)$$

$$w'(0) = 0 \quad (24b)$$

Kirişin serbest ucu ($x = L$):

$$M(x=L) = EI \cdot w''(L) = 0 \quad (24c)$$

$$F(x=L) = EI \cdot w'''(L) = 0 \quad (24d)$$

(22) kullanılarak (24) çözümlerse, istenen sabitler bulunur:

$$C_1 = \frac{C_0}{2} \cdot \frac{e^{-2\beta L}(s-c) - e^{-\beta L}}{2e^{-\beta L} + (1 + e^{-2\beta L})c} \quad (25a)$$

$$C_2 = -\frac{C_0}{2} \cdot \frac{s+c + e^{-\beta L}}{2e^{-\beta L} + (1 + e^{-2\beta L})c} \quad (25b)$$

$$C_3 = -\frac{C_0}{2} \cdot \frac{e^{-2\beta L}(s+c) + c - s + 2e^{-\beta L}}{2e^{-\beta L} + (1 + e^{-2\beta L})c} \quad (25c)$$

$$C_4 = -\frac{C_0}{2} \cdot \frac{e^{-2\beta L}(s-c) + c + s}{2e^{-\beta L} + (1 + e^{-2\beta L})c} \quad (25d)$$

Bu denklemlerde $s \equiv \sin \beta L$ ve $c \equiv \cos \beta L$ olarak tanımlanmıştır. Elektrostatik kuvvetler altında, en büyük çökme kirişin serbest ucunda olur:

$$w_{max} = C_0 + C_1 e^{\beta L} + C_2 e^{-\beta L} + C_3 \cos \beta L + C_4 \sin \beta L \quad (26)$$

Denklemleri boyutsuz hale getirmek için her taraf d 'ye bölünürse

$$\frac{w_{max}}{d} = -\frac{1}{2} + \frac{C_1}{C_1} e^{\beta L} + \frac{C_2}{C_2} e^{-\beta L} + \frac{C_3}{C_3} \cos \beta L + \frac{C_4}{C_4} \sin \beta L = f(\beta L) \quad (27)$$

bulunur. Burada boyutsuz katsayılar $\frac{C_i}{C_i} \equiv C_i/d$ ($i = 1, \dots, 4$) olarak tanımlanmıştır. Yukarıdaki denklem yine bir başka boyutsuz büyüklük olan βL 'in fonksiyonudur. (27) kullanılarak, βL 'yi

(w_{max}/d) oranının bir fonksiyonu olarak hesaplamak olasıdır. Şekil 6 böylesi bir bağıntıyı göstermektedir. Karşılaştırma yapılabilmesi için; Şekil 4'de (en üstteki grafik) verilmiş sayısal sonuçlar da burada gösterilmiştir. Dikkat edilirse, (16) ve (23a) kullanılarak α ve βL arasındaki dönüşüm

$$\beta L = \sqrt[4]{2\alpha} \quad (28)$$

kolayca yazılabilir. Böylece α 'nın fonksiyonu olan (w_{max}/d) bağıntısı, Şekil 6'da βL cinsinden ifade edilebilir.

Şekil 6'dan da görüleceği üzere, küçük (w/d) oranları için analitik çözümün hassas sayısal çözüme çok yakın olduğu görülür. Doğal olarak, iki çözüm arasında ortaya çıkan farklar, elektrostatik yüklerin "doğrusallaştırılması" nedeniyle ortaya çıkan yaklaşıklık hatasından kaynaklanmaktadır. Matematiksel açıdan, (26)'nın geçerliliğini koruması için (w/d) oranının belli bir değerin altında kalması gerekmektedir. Söz gelimi, ihmal edilen terimlerin toplamının, serinin genel toplamına oranı hesaplanırsa

$$\%E = 100 (w/d)^2 [3 - 2(w/d)] \quad (29)$$

elde edilir. Şekil 7 bu hata oranını göstermektedir. Anlaşılabacağı üzere, $w/d < 0.2$ iken, hata %10 altında kalmaktadır. Bunun üzerindeki değerler için, seri açılımı önemli yaklaşıklık hataları vermektedir. Ancak, Şekil 6'dan da görüleceği üzere, bu açılım (nispeten büyük w/d oranları için bile) **ön-tasarım** çerçevesinde kabul edilebilir mertebeden hesap hatalarına yol açmaktadır.

Mikro-kiriş sisteminin tasarımı sırasında göz önüne alınacak bir başka önemli unsur da, kirişte meydana gelen eğilme gerilmeleridir. Her ne kadar sisteme etkileyen yükler çok küçük olarak görülse de, kirişin mikro boyutları dikkate alındığında ortaya çıkan gerilmeler oldukça büyüktür. Mikro kirişe gelen en büyük eğilme gerilmesini hesaplamak için, öncelikle azami eğilme momentlerinin saptanması gerekir.

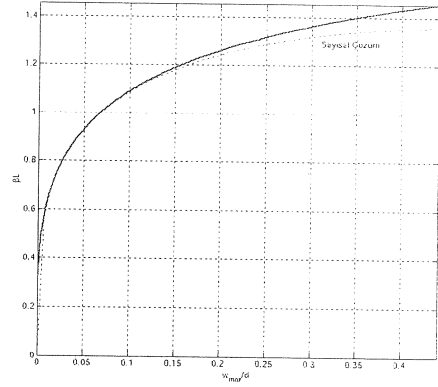
En büyük moment, konsol kiriş bağlantı noktasında ortaya çıkar:

$$M_{max} = EI w''(0) \quad (30)$$

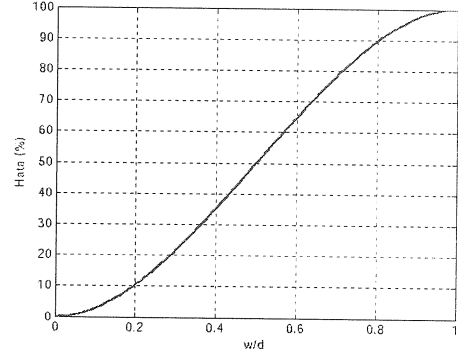
Benzer olarak en büyük eğilme gerilmesi bu kesitin en üst noktasında görülür:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{I} \cdot \frac{h}{2} \quad (31)$$

Burada $I = bh^3/12$ alan atalet momentidir. (30) ve (31) birleştirilirse



Şekil 6 Kiriş ucundaki çökmeye bağlı olarak βL 'nin değişimi.



Şekil 7 Seri için yaklaşıklık hatası.

$$\sigma_{max} = Ew''(0) \cdot \frac{h}{2} \quad (32)$$

elde edilir. Genel çökme denklemi (22) kullanılırsa,

$$w''(0) = \beta^2 (C_1 + C_2 - C_3) \quad (33)$$

olarak hesaplanır. (32) ve (33)'den istifade edilerek, aşağıdaki **boyutsuz** gerilme denklemi yazılabilir:

$$\frac{\sigma_{max}}{E} = (\overline{C_1} + \overline{C_2} - \overline{C_3}) \cdot \frac{\beta^2 dh}{2} \quad (34)$$

Dolayısıyla,

$$\frac{\sigma_{max}}{E} = \frac{(\beta L)^2}{2} (\overline{C_1} + \overline{C_2} - \overline{C_3}) \frac{d}{L} \cdot \frac{h}{L} \quad (35)$$

olarak ifade edilebilir. Tıpkı, büyük ölçekli (makro) sistemlerde olduğu gibi, ortaya çıkan en büyük gerilme, belirli bir emniyet gerilmesinden küçük olacak şekilde boyutlandırma yapılmalıdır:

$$\frac{\sigma_{max}}{E} = \mu(\beta L) \cdot \frac{d}{L} \cdot \frac{h}{L} \leq \frac{\sigma_v}{ES} \quad (36)$$

Burada σ_y kullanılan malzemenin akma ("yield") gerilmesini; S'de 2 ile 5 arasında seçilen bir emniyet faktörünü belirtmektedir. Yukarıda verilen boyutsuz denklemde μ fonksiyonu [(26)'de olduğu gibi] yalnızca βL parametresine bağlıdır. (27) ve (36) numaralı denklemleri kullanılarak μ 'yu (w_{max}/d)'nin fonksiyonu olarak ifade etmek olasıdır. Şekil 8 ön-tasarımda kullanılacak böylesi bir fonksiyonu göstermektedir. Şekil 4'de gösterilen sayısal sonuç (ortadaki grafik) burada da ayrıca gösterilmiştir. Dikkat edilirse

$$M_{max} = EI \left. \frac{d^2 w}{dx^2} \right|_{x=0} = EI \cdot \frac{d}{L^2} \cdot \left. \frac{d^2 w}{dx^2} \right|_{x=0}$$

$$= EI \cdot \frac{d}{L^2} \cdot m_0(\alpha) \quad (37)$$

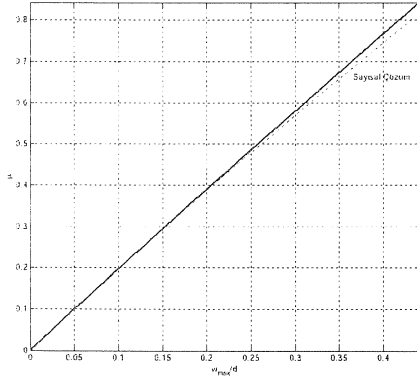
olduğu görülür. Dolayısıyla

$$\frac{\sigma_{max}}{E} = m_0(\alpha) \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{L} \cdot \frac{h}{L} \quad (38)$$

olur. (35) ve (37) karşılaştırılırsa, boyutsuz sayılar arasında

$$\mu(\beta L) = \frac{m_0(\alpha)}{2} \quad (39)$$

gibi bir bağıntı olduğu anlaşılır.



Şekil 8 Çökmeye bağlı μ faktörünün değişimi.

Klasik cisimlerin mukavemeti ilkeleri kullanılarak elde edilen bu bilgiler çerçevesinde; önerilen tasarım yordamı şu şekilde özetlenebilir:

1. Mikro-anahtar için öncelikle malzeme seçimi yapılır ve E, σ_y gibi önemli tasarım parametreleri belirlenir. Birçok MEMS sisteminde silisyum (Si) ana malzeme olsa da, mikro-anahtar sistemlerinde Au, Ag, Ni, Cu, Al gibi çeşitli metallerin kullanımı da oldukça yaygındır.

2. Uygun bir emniyet faktörü (S) seçilir. Ön tasarım aşamasında, bu faktör 2 ile 5 arasında alınabilir.
3. Verilmiş bir (w_{max}/d) anahtarlama aralığı için (ör. serbest ucun çökme miktarı) için Şekil 8'den μ faktörü okunur. Böylece, (36) numaralı ifade sayesinde

$$\frac{d}{L} \cdot \frac{h}{L} \leq \frac{\sigma_y}{\mu ES} \quad (40)$$

d, h, ve L boyutları seçilir.

4. Ardından verilmiş (w_{max}/d) oranı için, Şekil 6'dan βL faktörü okunur. (23a) denklemi kullanılarak, uygulanacak gerilimin şiddeti bulunur:
- 5.

$$V = \sqrt{\frac{E(\beta L)^4 (dh)^3}{12 \epsilon_0 L^4}} \quad (40)$$

Mikro-anahtar uygulamaları için, gerilimin genelde 3 ile 120 V arasında olması istenir zira daha yüksek gerilimlerin CMOS teknolojisiyle kontrolü oldukça zordur. Denklem (40) ile hesaplanan gerilimin yüksek çıkması durumunda, 3. adıma geri dönmek gerekecektir. Bu adımda özellikle d'nin küçültülerek, L büyütülmesi önerilmektedir.

6. Son olarak, kirişin genişliği (b) belirlenir. Elektrostatik olarak tahrik edilen mikro kirişlerde b önemli bir rol oynamamaktadır. Dolayısıyla, bu boyut kullanılan mikro-üretim tekniğiyle uyumlu olarak seçilmelidir. Genelde $b = 5 \dots 10h$ olarak alınması önerilebilir.
7. Tasarım tamamlandıktan sonra, (22)'yi kullanarak elastik eğriyi çizdirmek faydalı olacaktır. Ayrıca, denklem (35)'den yararlanarak kritik kesitteki gerilmelerin bulunması tasarımın kontrolü açısından önemlidir.

Bir uygulama örneği olarak, silisyum gövde üzerinde oluşturulmuş altın (Au) bir mikro-anahtar sistemi ele alınsın.

1. Bu altın mikro kiriş için gerekli malzeme özellikleri şöyledir: $E = 81$ [GPa] ve $\sigma_y = 210$ [MPa].
2. Bu sistemin emniyet faktörü $S = 3$ olarak seçilsin.
3. Bu sistem için (w_{max}/d) = 0.25 olsun. Şekil 8'deki kesikli eğriden (hassas sayısal çözüm) bu çökme oranına karşılık gelen $\mu = 0.4794$ olarak okunur. Böylece

$$\frac{d}{L} \cdot \frac{h}{L} \leq \frac{\sigma_y}{\mu ES}$$

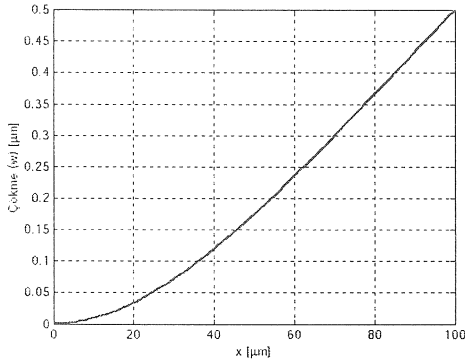
$L = 100 \mu\text{m}$; $h = 2 \mu\text{m}$; $d = 2 \mu\text{m}$ seçilirse $4 \cdot 10^{-4} \leq 1.8 \cdot 10^{-3}$ eşitsizliği sağlanır ve sistemdeki gerilmeler emniyet sınırları içinde yer alır.

4. Yine (w_{max}/d) = 0.25 oranı için, Şekil 6'daki kesikli eğriden $\beta L = 1.2885$ olarak okunur. Dolayısıyla, denklem (40) aracılığıyla gerilim $V =$

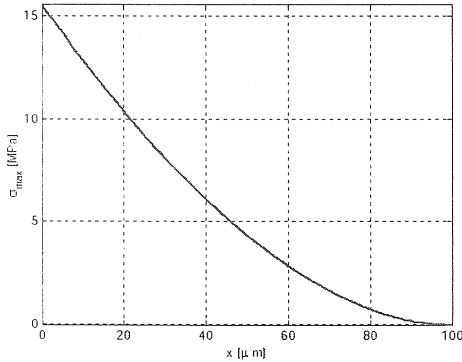
36.67 [V] \approx 36.7 [V] olarak hesaplanır. Bu da kabul edilebilir bir değerdir.

5. Kirişin genişliği $b = 5h = 5 \times 2 \mu\text{m} = 10 \mu\text{m}$ olarak seçilsin.
6. Şekil 9 ve 10 sırasıyla sayısal çözümle elde edilen elastik eğriyi ve azami eğilme gerilmesi değerlerini uzaklığın (x) fonksiyonu olarak göstermektedir.

Bu makalede, tasarım problemini basitleştirmek amacıyla, yürütülen tüm tasarım hesaplarında bütün dinamik etkiler ve kirişle onun temas yüzeyi arasındaki yapışma (adhezyon) kuvvetleri dikkate alınmamıştır. Bunun dışında, çevresel elektrik alanın etkileri de ("fringing") ihmal edilmiştir. Ancak, gerçekçi tasarımlarda bu gibi etkiler göz önüne alınmalıdır. Burada ele alınan örnekten de görüleceği üzere, analitik esaslı yaklaşımlar sadece çok basit sistemlerin incelenmesi (ve ön-tasarımı) için elverişlidir. Detaylı MEMS tasarımları için; ANSYS, MEMSCAD, MEMSCAP, Cadence, gibi bilgisayar destekli tasarım araçlarından geniş ölçüde yararlanmak gerekmektedir.



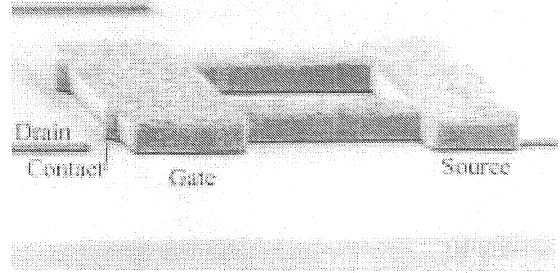
Şekil 9 Tasarlanmış mikro kirişin elastik eğrisi.



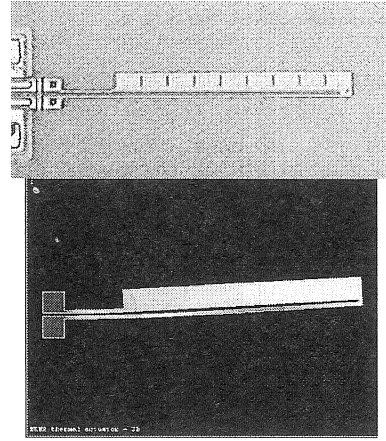
Şekil 10 Mikro kirişteki eğilme gerilmeleri.

Son olarak, birkaç tane MEMS tasarım uygulamasına değinilecektir. Şekil 10 altın kaplı nikelten yapılmış ve elektro-statik olarak tahrik edilen bir mikro-anahtar uygulamasını göstermektedir [10]. Burada kirişi karakterize eden temel boyutlar şöyledir: $L = 70 \mu\text{m}$; $b = 30 \mu\text{m}$; $h = 2 \mu\text{m}$; $d = 1.5 \mu\text{m}$. Şekil 10 ısıtılarak hareket

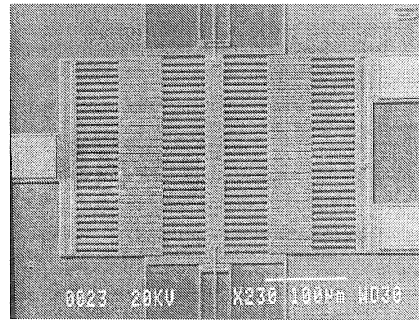
ettirilen bir mikro-kiriş sistemini ("heatuator") göstermektedir. Sistemin MEMSCAD ile gerçekleştirilmiş sonlu eleman analizi de aynı şekilde gösterilmektedir. Şekil 11 atalet kuvvetlerinin etkin olarak dengelendiği bir ivme ölçer sistemi göstermektedir. Şekil 12 elektro-statik olarak tahrik edilen sistemlerde kullanılan bir tarak mekanizmasının ANSYS ile sonlu eleman analizini temsil etmektedir [16].



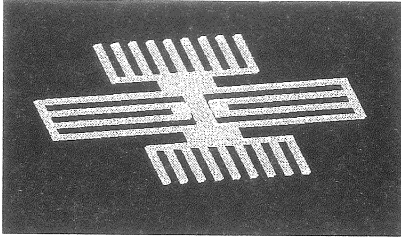
Şekil 9 Bir mikro anahtar tasarımı [10].



Şekil 10 Isıl eyleyici sistemi ve onun sonlu eleman analizi [16].



Şekil 11 Etkin denge esaslı bir MEMS ivme ölçer sistemi [16].



Şekil 12 Tarak-tipi tahrik sisteminin sonlu eleman analizi [16].

SONUÇ

Son yıllarda silisyum tabanlı mikro duyucular ve eyleyiciler konusunda yoğun çalışmalar olmuş ve çarpıcı gelişmeler meydana gelmiştir. Bu makalede, MEMS'lerin tasarımında önemli rol oynayan ölçeklendirme yasaları detaylı olarak ele alınmış, bu tip sistemlerin tasarlanması sırasında dikkat edilmesi gereken noktalar kısaca vurgulanmıştır. Bir tasarım örneği olarak, basit bir mikro-anahtar uygulaması ele alınarak; böyle sistemlerin tasarım ilkeleri detaylı olarak açıklanmıştır.

MICROELECTROMECHANIC SYSTEMS (MEMS): DESIGN AND SCALING LAWS

In this paper, the design principals associated with Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) are discussed briefly. The paper also introduces the scaling laws used in MEMS design. To illustrate these MEMS design principles, a microswitch design is elaborated. The paper also focusses on the pitfalls on various design approaches and discusses some of the CAD design tools used in industry in a limited sense.

Keywords: MEMS, Micro Systems Design, Scaling, Dimensionless analysis, Microswitch design.

KAYNAKÇA

1. Analog Devices, "ADXL150/ADXL250 rev.0" ürün kataloğu, Norwood, MA, 1996.
2. Lorenz, R. D., "Sensorless Control: High Bandwidth Tracking of Spatial Saliencies using Persistent Excitation," *WEMPEC/CAST Seminer Notları*, University of Wisconsin - Madison, 1999.

3. Feynman, R. P., "There's Plenty of Room at the Bottom," (tekrar basım) *Journal of Microelectromechanical Systems*, cilt 1:1, 60-66, Mart 1992
4. Howe, R. T., "Surface Micromachining for Microsensors and Microactuators," *Journal of Vac. Sci. Technology*, cilt 6, 1809-1813, Aralık 1988.
5. Menz, W., Bacher, W., Harmening, M., and Michel, A., "The LIGA Technique - a Novel Concept for Microstructures and the Combination with Si-Technologies by Injection Molding," *IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems*, Nara, Japan, 69-73, 1991.
6. Foong, C. S., Wood, K. L., and Busch-Vishniac, I., "Design Assessment of Micro-Electro-mechanical Systems with Applications to a Microbiology Cell Injector," *Micromechanical Systems, ASME DSC*, cilt 46, 49-63, 1993.
7. Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Umans, S. D., Electrical Machinery, 5/e, McGraw-Hill Inc., NY, 1990.
8. Trimmer, W. S. N., "Microrobots and Micromechanical Systems," *Sensors and Actuators*, cilt 19:3, 267 - 287, 1989.
9. Michalicek, M. A., "Introduction to Microelectromechanical Systems," online sunu (<http://mems.colorado.edu/>), University of Colorado, Boulder, Mayıs 2000.
10. McCarthy B, Adams, G. G., ve McGruer N. E., "A Dynamic Model, Including Contact Bounce of an Electrostatically Actuated Microswitch," *Journal of MEMS*, cilt 11:3, sf. 276-283, 2002.
11. Press, W. H., et al, *Numerical Recipes in C*, 2/e, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1992.
12. Choi, B. ve Lovell, E. G., "Improved Analysis of Microbeams under Mechanical and Electrostatic Loads," *J. of Micromech. Microeng.*, cilt 7, sf. 24-29, 1997.
13. Kirkpatrick, S., et al, "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, cilt 220, sf. 4598, 1983.
14. Kovacs, G. T. A., *Micromachined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, New York, 1998.
15. Petersen, K. E., "Dynamic Micromechanics on Silicon: Techniques and Devices," *IEEE Trans. on Electron Devices*, cilt ED-25:10, sf. 1241-1250, 1978.
16. ANSYS MEMS Eğitim Notları, (CD), ANSYS, Inc., PA, 2001.