



ARAŞTIRMA MAKALESİ | RESEARCH ARTICLE

# MEMS Tabanlı Bir Mikroakışkan Kanaldaki Mikro Kirişin Sonlu Elemanlar Analizi

\*  Ishak ERTUGRUL

\*Muş Alparslan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Mekatronik Bölümü, Muş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding author: <a href="mailto:i.ertugrul@alparslan.edu.tr">i.ertugrul@alparslan.edu.tr</a> İ. Ertugrul, orcid.org/0000-0001-9586-0377	Geliş Tarihi /Received Date Kabul Tarihi /Accepted Date Yayın Tarihi / Published Date	17 Kasım 2020 27 Kasım 2020 21 Aralık 2020
---	---	--

**Alıntı / Citation :**

Ertugrul, I. (2020). *Finite Element Analysis of Beam in a MEMS-Based Microfluidic Channel*, Journal of Scientific Technology and Engineering Research, 1(2):40-44. Doi: 10.5281/zenodo.4289264

## Finite Element Analysis of Micro Beam in a MEMS-Based Microfluidic Channel

**Özet**

Bir mikro kirişin fiziksel özelliklerinin, kirişin içerisine daldırıldığı sıvıya ve mikro kanallara büyük ölçüde bağlı olduğu iyi bilinmektedir. Bu çalışmada, MEMS (Mikro Elektro-Mekanik Sistemler) tabanlı mikroakışkan kanal içerisindeki mikro kirişin sonlu elemanlar analizleri ayrıntılı bir şekilde yapılması amaçlanmıştır. Bu analizler von Mises gerilimi, basınç miktarları, hareket sırasında oluşan hızlar ve yer değiştirmeleri kapsamaktadır. Kiriş için Euler-Bernoulli denklemi kullanılarak akışkan içinde sabit bir mikro kiriş modellenerek analizi yapılmıştır. Kararsız Stokes denklemleri, mikro kiriş kesitlerini içeren iki boyutlu bir düzlemde bir Helmholtz ayrıştırma tekniği kullanılarak çözülmektedir. Comsol Multiphysics yazılım sonuçlarını kullanan sonlu elemanlar yöntemi, doğrulama için mevcut yöntemle karşılaştırılmış ve aralarında kabul edilebilir bir eşleşme elde edilmiştir. Basınç, hız ve yer değiştirme analizleri tüm sınır koşulları sağlanarak oluşturulmuştur. Mevcut formülasyonun, sorunu iyi bir doğrulukla çözmek için uygun ve yeni bir yaklaşım olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak çalışmada, yoğunluk, viskozite ve mikroakışkan sensörlerinin tasarımında ve yorumlanmasında kullanılacak teorik bir model sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Mikro Kiriş, Mikroakışkan, MEMS, Comsol.

**Abstract**

It is well known that the physical properties of a micro beam are largely dependent on the fluid and micro channels in which the beam is immersed. In this study, the finite element analysis of the micro beam within the microfluidic channel based on MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) is aimed to be made in detail. These analyzes include von Mises stress, pressure quantities, velocities, and displacements during movement. Using the Euler-Bernoulli equation for the beam, a micro-beam fixed in a fluid is modeled and analyzed. Unstable Stokes equations are solved using a Helmholtz decomposition technique in a two-dimensional plane containing micro-beam sections. The finite element method using the Comsol Multiphysics software results is compared with the current validation method, and an acceptable match is obtained between them. Pressure, velocity, and displacement analyzes were created by ensuring all boundary conditions. The current formulation has been shown to be a suitable and novel approach to solve the problem with good accuracy. As a result, a theoretical model is provided that can be used in the design and interpretation of density, viscosity, and microfluidic sensors.

**Keywords:** Micro Beam, Microfluidic, MEMS, Comsol.

## I. GİRİŞ [INTRODUCTION]

Farklı koşullara sahip mikro kirişler, birçok mikro cihazın temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Mikro rezonatörler, mikro anahtarlar, mikro jiroskoplar ve ivmeölçerler bunlardan bazılarıdır [1-3]. Bu tür cihazlar mikro kirişin piezoelektrik veya elektrostatik kuvvetler tarafından çalıştırıldığı örneklerdendir.

Mikro-densitometreler, mikro biyosensörler, mikro-viskozite ölçerler ve mikro-rezonatörler gibi bazı durumlarda çalışan mikro kirişi bir sıvı ortamına daldırabilmektedir. Mikro kiriş bir gaz ortamında çalıştığında, çevreleyen gazın eklenen sönümlenme ve sertlik etkilerinin ortaya çıktığı ve cihazların performansını önemli ölçüde değiştirebileceği gösterilmiştir [4]. Bununla birlikte, bazı cihazlarda mikro kiriş bir sıvıyla çevrelenmiş olabilir. Bu durumlarda, sönümlenme etkilerine ek olarak, çevreleyen sıvı, mikro-elektro-mekanik sistem cihazın dinamik analizinde önemli olan, eklenen kütle olarak karakterize edilen bir reaksiyon kuvveti uygular.

Mikro yapılar için sıvı viskozitesi, frekans tepkilerini büyük ölçüde etkileyebilir. [5], özellikle otomatik kuvvet mikroskobu uygulamaları ile ilgili olan, bükülme titreşimlerine maruz kalan ve viskoz sıvılara daldırılan konsol kirişlerin frekans tepkisi için titiz bir teorik model sunmuştur. Mikro ışınların frekans analizine ilişkin bilgi ve anlayış, otomatik kuvvet mikroskobu uygulamasında temel pratik öneme sahiptir.

Klasik bir akış modeli, akışkan bir nesneden geçerken oluşabilen von Kármán vorteks girdabıdır. Bu girdaplar nesnede titreşimlere neden olabilir. Bu problem, büyük deformasyonun akış yolunu etkilediği bir akışkan-yapı etkileşimini içerir. Yapının çevresinde akışkanın oluşturduğu salınımın büyüklüğü ve frekansları hesaplanarak Turek ve Horn tarafından önerilen değerlerle karşılaştırılır [5]. Bir mikro ışının frekans analizi, içine daldırıldığı sıvının özelliklerinden önemli ölçüde etkilenebilir. Vakumda doğal frekansların hesaplanması rutin olarak gerçekleştirilebilirken, sıvıya daldırmanın etkilerinin analizi zorlu bir zorluk teşkil eder. Daldırılmış bir mikro ışının modal tepkisi, sıvının özelliklerinden önemli ölçüde etkilenebilir. Sıvı yapı etkileşimi nedeniyle eklenen kütle etkisi, ancak, doğal frekanslarda önemli değişikliklere neden olabilir. Bu viskoz akışkan yapı bağlantısının bilgisi ve anlaşılması şu anda eksiktir.

Son yıllarda, makro ve mikro yapılarda etkileşen sıvıların ilave kütle etkilerini araştıran bir dizi makale yayınlandı. Esmailzadeh ve ark. sıvı içeren veya sıvıya daldırılmış yapısal elemanların serbest titreşim frekanslarını üretmiştir. Yapı üzerindeki hidrodinamik sıvı basıncını hesaplamak için potansiyel bir işlev kullandılar [5]. Liang ve ark. ampirik olarak eklenen

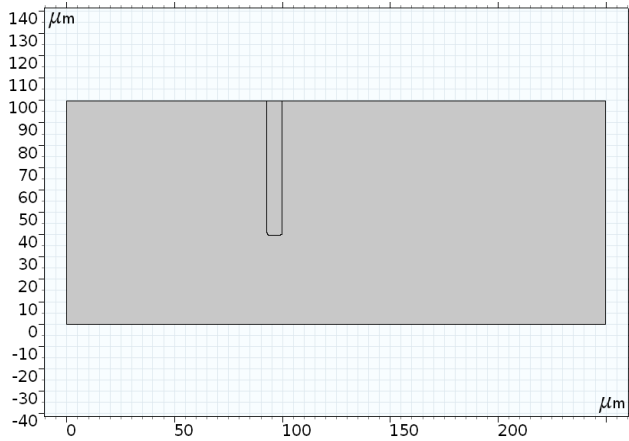
bir kütle kullanarak daldırılmış konsol plakaların serbest titreşimini araştırdı. Suya batırılmış plakaların farklı görünüş oranları ve kalınlıkları için titreşim özelliklerini çıkardılar [6]. Lindholm ve ark. dikdörtgen plakaların havada ve sudaki doğal frekanslarını değerlendirmek için çeşitli deneyler yaptılar [7]. Ergin ve ark. kısmen daldırılmış bir konsol plakasını analiz etmek için bir görüntü yöntemiyle sınır ögesi yöntemini kullandı. Farklı batık oranları için sonuçları çıkardılar ve yöntemin daha yüksek frekanslar için daha doğru olduğunu gösterdiler [8]. Gorman ve ark. bir dirsekli mikro-kiriş ile sıkıştırılabilir bir akışkan arasındaki güçlü bir bağlantı durumunu inceledi ve kuru kiriş frekanslarını ıslak kiriş frekanslarından elde etmeyi başardılar [9]. Ertugrul ve ark. [10] bir mikroakışkan çip tasarlayıp analiz ettikten sonra trombositleri Kırmızı Kan Hücrelerinden ayırmak için optimizasyon teknikleri geliştirmeyi amaçlamıştır. Atkinson ve de Lara [11], temas eden sıvının viskozitesini hesaba katarak sıvı basıncı için basitleştirilmiş bir analitik ifade kullanarak plakanın frekans yanıtını elde ettiler. Jeong [12], fourier serisi genişlemesi ve Rayleigh-Ritz yöntemini kullanan sıkıştırılabilir, viskoz olmayan bir sıvı ile birleştirilen iki özdeş dairesel plakanın doğal frekanslarını teorik olarak inceledi. Daha sonra, sıvının sıkıştırılabirliğini birleştirilmiş halka şeklindeki plakalar için hesaplamalara dâhil etti ve sıkıştırılabirlik faz dışı modlar üzerinde faz içi modlardan daha fazla etkiye sahip olduğu sonucuna vardı. Jeong ve ark. [12], iki özdeş dikdörtgen plakanın birleştirilmiş frekanslarını değerlendirmek için aynı yaklaşımı kullandı. Mikro yapılardaki uygulamalarla ilgili Rezazadeh ve ark. [13] elektrostatik olarak çalıştırılan mikro kirişler üzerindeki sıvı yükünü araştırmış ve sabit sıvı basıncına bağlı olarak doğal frekansları ve eklenen kütleleri üretmiştir. Deneysel bir çalışmada, Harrison ve ark. [14], bir sıvıya batırılmış mikro fabrikasyonla bir rezonans plakası üzerindeki yakın bir katı duvarın etkisini inceledi. Sıvının etkilerini ilave bir kütle olarak modellediler ve sönümlenme eklediler ve sistemin frekans tepkisini incelediler.

Bu çalışmada, sınırlı sıkıştırılabir ve viskoz olmayan bir sıvı alanı ile çevrili bir mikroakışkan içerisindeki kirişin basınç, hız ve yerdeğiştirme analizleri incelenmiştir. Analiz, kiriş-akışkan ara yüzü ve bir hayali akışkan ara yüzünde eşit kinematik koşulların varsayımına dayanmaktadır. Kiriş ve sıvı titreşimi için doğrusal olarak üst üste binen mod şekilleri kullanılır

ve öz değer probleminde yol açan yönetim denklemlerini türetmek için Galerkin'in yöntemi kullanılır. Bağlantılı sistemin doğal frekansları, kiriş ve sıvının farklı geometrik ve malzeme özellikleri için gösterilmiştir. Bu çalışmanın motivasyonu, yoğunluk ve viskozite sensörlerinin tasarımında ve yorumlanmasında kullanılabilecek teorik bir model sağlamaktır.

## II. MODEL TANIMLAMA [MODEL DEFINITION]

Model geometrisi, aşağıda Şekil 1'de gösterildiği gibi akışkan akışlı bir kanal içindeki bir yapıdan oluşur. Mikroakışkanın alanı 250  $\mu\text{m}$  uzunluğunda ve 100  $\mu\text{m}$  yüksekliğinde bir kanaldır. Mikro kiriş ise elastik malzemeden yapılmış 60  $\mu\text{m}$ 'ye 7  $\mu\text{m}$ 'lik dikdörtgen bir kiriştir.



Şekil 1. Katı ve akışkan alanları içeren model geometrisi

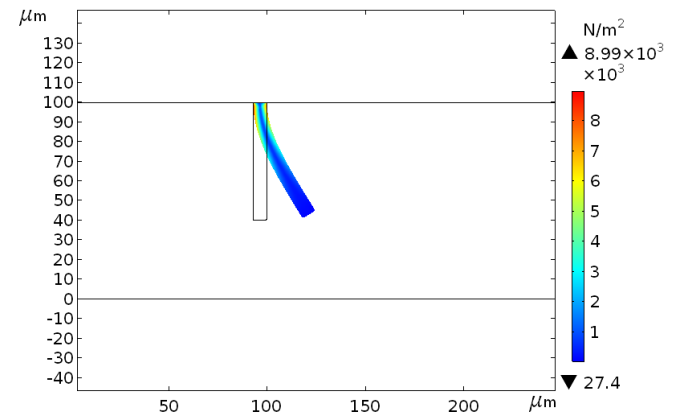
Akışkan, kanala soldan 0.065 m/s'lik bir ortalama hız ile girer ve giriş hız profilinin tam olarak geliştiği varsayılır. Giriş sınırı katı yapıya çok yakın olduğundan, giriş hızı koşulunun akış modelini etkilemesi beklenebilir. Böyle bir etkiden kaçınmak için giriş sınırı ile katı yapı arasındaki mesafenin artırılması gerekebilir. Karşılaştırma amacıyla, bu modeldeki geometri referans belgesinde olduğu gibi sabit değerde tutulur. Akışkan ve katı özellikler aşağıdaki tabloda gösterilmektedir (Tablo 1).

Tablo 1. Akışkan ve Katı Malzeme Özellikleri

Parametre	Değer
sıvı yoğunluğu	1003 kg/m <sup>3</sup>
dinamik viskozite	0.001 Pa.s
young's modülü	200 kPa
poisson oranı	0.4

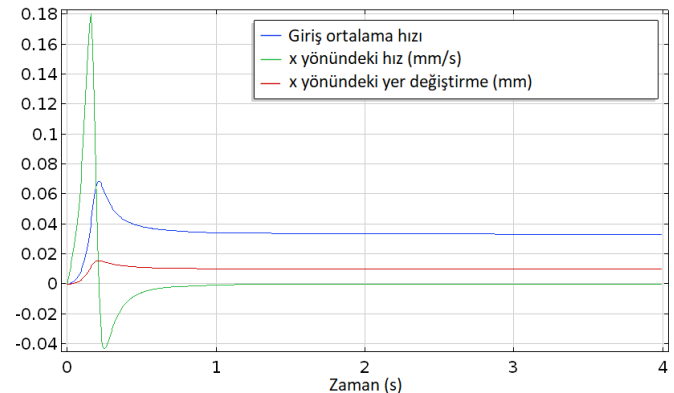
## III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA [RESULTS AND DISCUSSION]

Bu bölümde analizler neticesinde elde edilen sonuçlar verilmiştir. Gerçekleştirilen bütün analizler COMSOL programı kullanılarak yapılmıştır. Farklı zamanlarda deforme olmuş yapı üzerindeki yapıdaki von Mises gerilimi Şekil 2'de gösterilmiştir. Yapının ötesinde, önemli ölçüde deforme olan ve akış alanını etkileyen von Kármán girdabına dikkat edilmesi gerekmektedir. Mikro kiriş üzerindeki maksimum von Mises gerilimi  $8.99 \times 10^3 \text{ N/m}^2$  olduğu görülmüştür.



Şekil 2. Mikrokanaldaki von Mises gerilimi

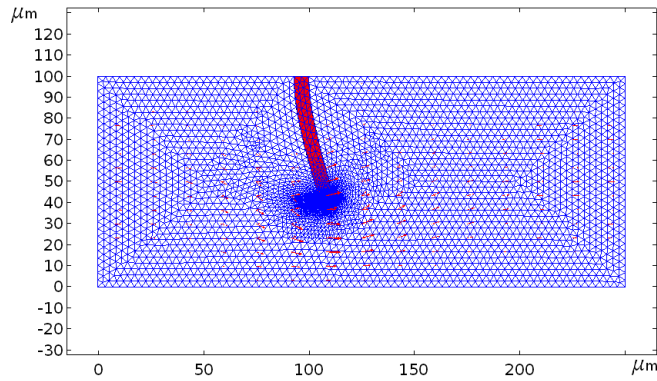
Şekil 3'de ise mikro kirişin x yönündeki yer değiştirmesi ve hızları gösterilmiştir. Mikro kirişin x yönündeki maksimum yer değiştirmesi 0.01 mm, x yönündeki maksimum hızı 0.17 mm/s ve sıvının ortalama giriş hızı da 0.065 mm/s olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. Zamana göre akış hızları ve yer değiştirme

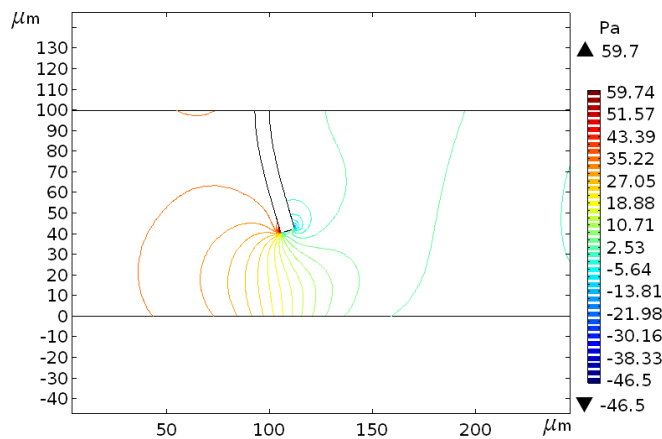
Şekil 4'te akışkan sıvının mikro kiriş üzerindeki deformasyon yönleri gösterilmiştir. Sıvı akış yönü şekilden de görüleceği üzere soldan sağa doğrudur. Okların yoğunluğunun en çok kirişin uç bölgesinin altında olması en fazla deformasyonun bu bölgede

olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Akışkanın oluşturduğu deformasyon yönü

Son olarak kırığin akışkan içerisinde meydana getirdiği basınç Şekil 5'teki gibi ölçülmüştür. Yapılan incelemeler sonucunda maksimum basınç kırığin ucunda olup 59.7 Pa olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 5. Akışkan kanal ve kırışteki basınç ölçümü

#### IV. SONUÇ [CONCLUSION]

Bu makale, viskoz bir sıvıya batırılmış mikro kırığin davranışını anlamak için modellemesi yapılarak analizleri ayrıntılı bir biçimde gerçekleştirilmiştir. Mevcut modelin geçerliliği analizler sonucunda sağlam bir biçimde doğrulanmıştır. Bu analizler von Mises gerilimi, hareket sırasında oluşan hızlar ve yer değiştirmeleri ve basınç miktarlarını kapsamaktadır. Mikro kırığin üzerindeki maksimum von Mises gerilimi  $8.99 \times 10^3 \text{ N/m}^2$  olmuştur. Mikro kırığin x yönündeki maksimum yer değiştirmesi 0.01 mm ve maksimum hızı da 0.17 mm/s olarak elde edilmiştir. Mikro sistemdeki maksimum basınç kırığin ucunda olup 59.7 Pa olduğu anlaşılmıştır.

Önerilen yöntemin ana uygulaması, viskoz malzemelerin reolojik özelliklerinin karakterizasyonu dur. Ek olarak, çalışma karmaşık mühendislik tasarım

problemleri için optimizasyon aracı için daha da genişletilebilir.

#### Çıkar Çatışması / Ortak Çıkar Beyanı

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması veya ortak çıkar beyan edilmemiştir.

#### Etik Kurul Onay Beyanı

Yazarlar bu makalenin etik kurul onayı veya herhangi bir özel izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### Araştırma ve Yayın Etiği Bildirgesi

Makalenin yazarları, makalenin tüm süreçlerinde JSTER'nin bilimsel, etik ve alıntı kurallarına uyduklarını ve toplanan veriler üzerinde herhangi bir tahrifat yapmadıklarını beyan ederler.

#### KAYNAKLAR [REFERENCES]

- [1] Butz, B., Dolle, C., Halbig, C. E., Spiecker, E., Eigler, S., "Highly Intact and Pure Oxo Functionalized Graphene: Synthesis and Electron Beam Induced Reduction", *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 55, no. 51, 15771-15774, 2016.
- [2] Ülker, O., Ertugrul, İ., "Mikro Kiriş Uzunluğu Değişiminin Deformasyona Etkisinin Araştırılması", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 18, 136-141, 2020.
- [3] Vahdat, A. S., Rezazadeh, G. "Effects of axial and residual stresses on thermoelastic damping in capacitive micro-beam resonators", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 348, no. 4, 622-639, 2011.
- [4] Turek, S., Hron, J., "Proposal for numerical benchmarking of fluid-structure interaction between an elastic object and laminar incompressible flow", In *Fluid-structure interaction*. Springer, Berlin, Heidelberg, 371-385, 2006.
- [5] Esmailza.deh, M., Lakis, A.A., Thomas, M., Marcouiller, L., "Three-dimensional modeling of curved structures containing and/or submerged in fluid", *Finite Elem. Anal. Des.* Vol. 44, 334-345, 2008.
- [6] Liang, C.C., Liao, C.C., Tai, Y.S., Lai, W.H., "The free vibration analysis of submerged cantilever plates", *Ocean Eng.* Vol. 28, no. 9, 1225-1245, 2001.
- [7] Lindholm, U.S., Kana, D.D., Chu, W.H., Abramson, H.N., "Elastic vibration characteristics of cantilever plates in water", *J. Ship Res.* Vol. 9, 11-12, 1965.
- [8] Ergin, A., Ugurlu, B.: Linear vibration analysis of cantilever plates partially submerged in fluid. *J. Fluids Struct.* 17(7), 927-939 (2003)
- [9] Gorman, D.G., Trendafilova, I., Mulholland, A.J., Horacek, J., "Analytical modeling and extraction of the modal behavior of a cantilever beam in fluid interaction", *J. Sound Vib.* Vol. 308, 231-245, 2007.
- [10] Ertugrul, I., Ulker, O., "Dielectrophoretic separation of platelet cells in a microfluidic channel and optimization with



fuzzy logic”, RSC Advances, vol. 10, no. 56, 33731-33738, 2020.

[11] Atkinson, C., Manrique de Lara, M., “The frequency response of a rectangular cantilever plate vibrating in a viscous fluid”, J. Sound Vib. vol. 300, 352–367, 2007.

[12] Jeong, K.-H., “Hydroelastic vibration of two annular plates coupled with abounded compressible fluid”, J. Fluids Struct. vol. 22, no. 8, 1079–1096, 2006.

[13] Rezazadeh, G., Fathalilou, M., Shabani, R., Tarverdilo, S., Talebian, S., “Dynamic characteristics and forced response of an electrostatically-actuated microbeam subjected to fluid loading”, Microsyst. Technol., vol. 15, 1355–1363, 2009.

[14] Harrison, C., Tavernier, E., Vancauwenberghe, O., Donzier, E., Hsu, K., Goodwin, A.R.H., Marty, F., Mercier, B., “On the response of a resonating plate in a liquid near a solid wall”, Sens. Actuators A vol. 134, 414–426, 2007.



**Ishak ERTUGRUL** was born in Diyarbakir, Turkey in 1986. He received the M.S. degree in mechatronics engineering from the Marmara University, Istanbul, in 2015, the Ph.D. degree in mechatronics engineering from Marmara University, Istanbul, in 2019. From 2012 to 2019, he was a Research Assistant with the

Marmara University. Since 2019, he has been an Assistant Professor with the Mechatronics Department, Muş Alparslan University. His research interests include MEMS, NEMS and Microsystem.