

# Belvermeye Dayalı Nano Konumlandırıcının Simulasyon Tabanlı Yapısal Analizi

Mustafa Yiğit ÖZDEMİR<sup>1</sup>, Tuna Nişli<sup>2</sup>, Serhat Yeşilyurt<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mekatronik Programı  
Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
myigit@su.sabanciuniv.edu

<sup>2</sup>Mekatronik Programı  
Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
tuna@su.sabanciuniv.edu

<sup>3</sup>Mekatronik Programı  
Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
syesilyurt@sabanciuniv.edu

## Özetçe

Nano konumlandırıcılar günümüzde giderek artan bir hızla, bir çok alanda kullanılan ve ihtiyaç duyulan cihazlardır. Nano konumlandırıcıların üretiminde kullanılan mevcut üretim sistemleri birden fazla parçanın montajına dayalı karmaşık yapıların kullanılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle üretilen konumlandırıcıların duyarlılığı üretimdeki aşamalara ve montajın hassasiyetine doğrudan bağlıdır. Bu boyutlardaki uygulamalarda montajın hassasiyeti çok ciddi sorunlar teşkil etmektedir.



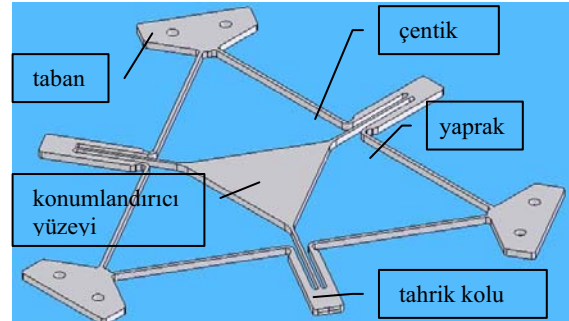
Şekil 1: Belvermeye dayalı nano konumlandırıcı

Bu soruna getirilebilecek en doğrudan çözüm, montaj kullanmak yerine, üretim kolaylığı ve dayanım açısından daha umut vadeden tek parçaya dayalı nano konumlandırıcı tasarımlarıdır (Şekil 1). Tek parça konumlandırıcılar, genelde malzemenin belverme özelliğine dayalı işleyen, burulma ve bükülmenin kontrol edilebildiği, nano konumlandırma uygulamalarına son derece uygun yapıda mekanizmalardır. Belli bir kuvvet veya moment altında önceden belirlenmiş geometrik yapının istenen yönlerde şekil değiştirmesi esasına dayanırlar.

Bu çalışmada, nano konumlandırıcı yüzeyinin, tahrik kollarındaki yer değiştirmeye bağlı olarak yaptığı hareket sonlu eleman analizi ve çeşitli bilgisayar tabanlı simülasyonlar kullanılarak ilişkilendirilmiştir. Muhtelif girdi dizilimleri ve kuvvet dağılımları uygulanarak girdi özelliklerinin çıktıyla bire-bir ilişkilendirilmesine çalışılmıştır.

## 1. Giriş

Günümüzde nano konumlandırıcılar uzay araştırmalarından elektroniğe kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bu konumlandırıcıların kontrolü teferruatlı kontrol teknikleri gerektiren son derece önemli bir konudur. Geçerli bir kontrol tekniği geliştirebilmek için nano konumlandırıcının uygulanan girdilere karşı verdiği tepkilerin incelenmesi gereklidir. Böylelikle konumlandırıcı yüzeyinde elde etmek istediğimiz yer değişim değerleri için gerekli tahrik kuvvetleri hesaplanabilir.



Şekil 2: Konumlandırıcı parçaları

Konumlandırıcının geometrik ve yapısal özellikleri uygulanan kuvvetler altında geçirdiği şekil değişiklikleriyle doğru orantılıdır. Yüksek yorulma dayanımına sahip bir materyalin kullanımı düzenli bir hareket elde etmek için en temel koşullardan biridir. Geometrik olarak belvermeye dayalı konumlandırıcılar çentikler ve yapraklar olarak adlandırılan biçimsel öğeler içerirler. (Şekil 2)

Geometrinin basitleştirilmiş temel denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$1. \text{ çentik düzeltme çarpanı} \quad K = 0.565 \frac{t}{R} \times 0.166 \quad (1)$$

$$2. \text{ stres dağılım çarpanı} \quad K_1 = \frac{2.7t + 5.4R}{8R + E} + 0.325 \quad (2)$$

$$3. \text{ maksimum yer değiştirme} \quad q_{\max} = \frac{4KR}{K_t E_t} \quad (3)$$

$$4. \text{ sertlik çarpanı} \quad k_{\sigma_x} F_x = \frac{Ebt^3}{6KL^2R} \quad (4)$$

Formüllerdeki “t” kol kalınlığı, “R” çentik yarı çapı , E Elastisite modülü, “d” taban derinliği ve “L” kol uzunluğunu tanımlamaktadır.

Konumlandırıcının geometrik kısıtlamaları yukarıdaki denklemlere dayalı olarak oluşturulmuştur, gerekirse geometrinin üzerinde çeşitli oynamalar yapılabilir.

Geometrik özellikler ve ölçüler Tablo-1’de belirtildiği gibidir:

Tablo 1: Geometrik Özellikler

Çentikler	
Tahrik Kolu	1mm çap
Taban orta kısım	0.5 mm çap
Taban kenar kısımlar	2mm çap

Yapraklar	
Tabanlar arası yaprak uzunluk	44 mm
Tabanlar arası yaprak derinlik	1 mm
Tahrik kolu uzunluk	26.41 mm
Tahrik kolu derinlik	0.8 mm
Tüm parçanın kalınlığı	2 mm

Orta Üçgensel Bölge	
Kenar uzunluğu	35.18 mm
Çap	6 mm

Bu çalışmada, MATLAB ortamında yazılan bir kod yardımıyla COMSOL simülasyon programında yürütülen analizden elde edilen bilgiler kullanılarak, konumlandırıcının pozisyonu uygulanan yer değiştirmeye bağlı olarak incelenmiştir. Konumlandırıcı üç tahrik kolunun dikey ve yatay yönde uyguladığı bükülme kuvvetlerine dayanarak çalışmaktadır. Böylece toplamda 6 eksenli girdi uyguladığımız düşünülebilir. Tahrik kollarındaki bükülmeye bağlı olarak konumlandırıcı yüzeyi de toplamda 6 eksenli hareket yapabilir (dikey, yatay, doğrusal, yalpa, devrilme, yunuslama). Yani girdiler ve çıktılar arasındaki ilişki konumlandırıcının yapısal ve geometrik özelliklerine bağlı olan 6 eksene 6 eksen eşleşmesi olacaktır.

## 2. Metodoloji

Tahrik kolundaki bükülme ve konumlandırıcı yüzeyin yer değişimi arasındaki bağıntıyı ortaya çıkarmak için COMSOL’un MEMS çoklu fizik ortamı kullanılarak çeşitli adımlar içeren bir yöntem izlenmiştir. CAD çizimleri COMSOL ortamına başarılı bir şekilde aktarıldıktan sonra sonlu eleman analizine sokulmak üzere geometri örgülenmiştir ve aşağıdaki prosedür takip edilmiştir.

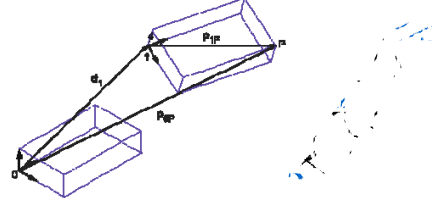
İlk olarak alt küme ayarları (madde özellikleri) Tablo 2’de belirtildiği gibi ayarlanmıştır:

Tablo 2: Alt küme ayarları

malzeme:	Titanium b-21S
elastisite modülü:	105e9 Pa
poisson oranı:	0.33
yoğunluk:	4940 kg/m3

Sonrasında, geometri üzerinde sınır değerleri ve kısıtlamalar belirlenmiştir. Civata delikleri sabitlenmiş ve öngörülen kuvvetler tahrik kollarına uygulanmıştır.

Sınır değerleri ve kuvvetler belirlendikten sonra konumlandırıcı yüzeyinin koordinat sistemini meydana getirmek üzere geometri üzerinde bir takım noktalar oluşturulmuştur. Bu noktalar kullanılarak oluşturulacak aktarma matrisiyle x, y, z yönündeki öteleme ve yunuslama, yalpa ve devrilme açıları elde edilebilecektir.



Şekil 3: Koordinat Sistemleri

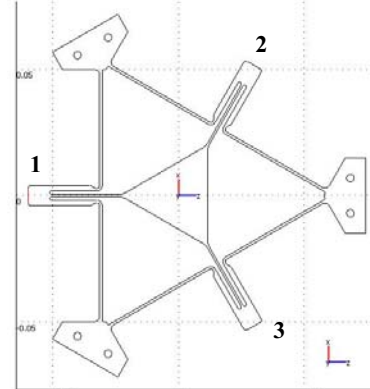
Şekil 3’te görüldüğü gibi geometri üzerinde oluşturulan noktalar orijin noktası 0 olan ana koordinat sistemini tanımlamaktadır. Simülasyon sonucunda elde edilen noktalar ise orijin noktası 1 olan koordinat sistemini temsil etmektedir. Orijin noktaları arasındaki yer değişimi kullanılarak ana koordinat sistemi 1 numaralı orijine taşınabilir. Daha sonra elde edilen bu taşınmış koordinat sistemi ve simülasyon verilerinden oluşturulan koordinat sistemi, normalize edilmiş vektörler  $(i_0, i_1, j_0, j_1, k_0, k_1)$  şeklinde yazılır. Bu vektörler aşağıdaki dönme matrisinin oluşturulmasında kullanılır.

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} i_1 \cdot i_0 & j_1 \cdot i_0 & k_1 \cdot i_0 \\ i_1 \cdot j_0 & j_1 \cdot j_0 & i_1 \cdot j_0 \\ i_1 \cdot k_0 & j_1 \cdot k_0 & k_1 \cdot k_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Elde edilen dönme matrisini de aşağıdaki yunuslama, yalpa ve devrilme gösterimine uygun olarak oluşturulmuş matrise eşitleyerek açılar hesaplanabilir.

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta & -s_\phi c_\psi + c_\phi s_\theta s_\psi & s_\phi s_\psi + c_\phi s_\theta c_\psi \\ s_\phi c_\theta & c_\phi c_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & -c_\phi s_\psi + s_\phi s_\theta c_\psi \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi \end{bmatrix} \quad (6)$$

COMSOL ortamında zaman bağlı simülasyonlar çalıştırıldıktan sonra her zaman aralığı için gerekli veriler toplanır ve MATLAB’a aktarılarak vektörlerin, açıların ve taşınma matrisinin hesaplanmasına geçilir. COMSOL’dan alınan veriler noktaların koordinatları değil yer değişimleri olduğu için yazılan programda her bir noktaya başlangıç değerleri de eklenmiştir. Son olarak girdi verilerini sonuçlarla ilişkilendirilen grafikler çizdirilir.



Şekil 4: Koordinat sistemi yerleşimi

Farklı kuvvet düzenleri ve malzemeler için de simülasyonlar yapılarak aradaki bağıntının tam olarak ortaya çıkartılmasına çalışılmıştır. Koordinat sistemleri için Resim 3 temel

alınmıştır. Konumlandırıcı üzerindeki koordinat sistemi Şekil 4'te belirtildiği gibi yerleştirilmiştir. Kolay tanımlamalar için tahrik kolları numaralandırılmıştır.

Simülasyon adımlarının devamında tahrik kollarına dikey ve yatay kuvvetler uygulamanın ayrı ayrı sonuçları incelenmiştir. Son olarak da farklı malzemeler kullanılarak kuvvetin yer değişimine olan etkisinin maddesel özelliklerden bağımsız olarak elde edilmesine çalışılmıştır.

## 2.1 Dikey Tahrik

### 2.1.1 Tek Koldan Tahrik

Tanımlanan koordinat sisteminin z ekseninde yer alan tahrik kolunun hareket ettirilmesi (1. kol) tam bir yunuslama etkisine yol açacaktır. Ama koordinat sistemimiz konumlandırıcı yüzeyinin tam ortasına denk geldiği ve yunuslama hareketinin dönme eksenini diğer iki tahrik kolunun üzerinden geçtiği için az da olsa bir taşıma etkisi de meydana gelecektir. Bu nedenle bütünüyle eşleme yapılması ve bu taşıma etkisinin de incelenmesi gerekmektedir.

Bu simülasyon için geçişsel analiz uygulanmıştır. Böylelikle girdiler ve çıktılar için zamana bağlı bir veri kümesi elde edilmiştir. Tahrik kolunun uç noktasına  $1*t$  ( $t$ = saniye) N kuvveti uygulanarak girdi olarak doğrusal bir yer değiştirme elde etmek amaçlanmıştır.

### 2.1.2 Çift Koldan Tahrik

Kuvvetlerin z ekseninde yer almayan tahrik kollarının ikisine de uygulanması durumunda ortaya çıkacak sonuç tek koldan tahrikle benzer olacaktır. Bu durum sadece yunuslama hareketine yol açacaktır ve analizin ilk adımından farklı bir sonuç vermeyecektir. Bu yüzden 2. ve 3. kollardan kuvvet vermek yerine 1. ve 2. kolları hareket ettirerek hem yunuslama hem de devrilme hareketlerini gözlemlemek amaçlanmıştır. Ayrıca 2. ve 3. kollar zıt kuvvetlerle hareket ettirilerek tam bir devrilme hareketi de oluşturmaya çalışılmıştır.

Uygulanan kuvvet ve simülasyon ayarları ilk analizle aynı alınmıştır.

### 2.1.3 Üç Koldan Tahrik

Tüm kollarla eşdeğer kuvvet uygulandığı takdirde konumlandırıcı yüzeyinde sadece y yönünde bir yer değiştirme gözlemlenecektir. Açılardaki değişim göz ardı edilebilecek kadar küçük kalacaktır.

Simülasyon sürecinin bu noktasında, süperpozisyon ilkesinin denenmesi için kuvvet kollarından birine (1.kol) diğerlerinin iki katı değerinde kuvvet uygulanmıştır. Böylelikle elde edilen çıktılar tek koldan tahrik ve üç koldan eşdeğer tahrik simülasyonlarıyla karşılaştırılarak süperpozisyonun geçerliliği sinanabilir.

## 2.2 Yatay Tahrik

### 2.2.1 Tek Koldan Tahrik

Tahrik kollarının hareket kabiliyeti yatay düzlemdeki hareketleri de kapsamaktadır. Tek koldan uygulanan ve kuvvet kolunun yan yüzeyine dik olan bir kuvvet, konumlandırıcı yüzeyinin yalpa hareketi yapmasına yol açacaktır. Bu durumda dönme eksenini konumlandırıcının ortasında değil bilinmeyen bir noktadadır.

### 2.2.2 Çift Koldan Tahrik

Çift koldan tahrik, tek koldan uygulandığında verdiği sonuca benzer bir yalpa hareketine yol açacaktır. Bu durumda

dönme eksenini başka bir noktaya kayacaktır. Zıt yönlerden kuvvet uygulandığı takdirde oluşan hareket, birbirlerini sıfırlayacağı için simülasyon yapılmasına gerek duyulmamıştır.

### 2.2.3 Üç Koldan Tahrik

Tüm kolların aynı teğet kuvvetle hareket ettirilmesi durumunda dönme eksenini konumlandırıcı yüzeyinin merkezinden geçen bir yalpa hareketine yol açacaktır. Yani, konumlandırıcı yüzeyinin y ekseninde düzgün bir dönme hareketi yapması için tüm kollarla eşit teğet kuvvet uygulamak gerekmektedir.

## 2.3 Farklı Malzemeler

Salt girdi ve çıktı konumlarına dayanan bir formül oluşturabilmek için malzeme değişkeninin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek için denklemlere bir malzeme katsayısı eklenebilir. Bu katsayısı bulmak için birçok değişik malzemeyle aynı simülasyon tekrarlanmış ve sonuçlar arasındaki ilişkiye dayanan bir formül geliştirilmiştir. Denenen farklı malzemelerin özellikleri Tablo 3'te belirtilmiştir.

Tablo 3: Malzeme alt küme ayarları

malzeme:	Titanyum beta-21S
elastisite modülü:	69e9 Pa
poisson oranı:	0.33
yoğunluk:	2700 kg/m <sup>3</sup>
malzeme:	Yapı çeliği
elastisite modülü:	200e9 Pa
poisson oranı:	0.33
yoğunluk:	7850 kg/m <sup>3</sup>
malzeme:	Alüminyum 6063-T83
elastisite modülü:	69e9 Pa
poisson oranı:	0.33
yoğunluk:	2700 kg/m <sup>3</sup>
malzeme:	Bakır
elastisite modülü:	110e9 Pa
poisson oranı:	0.35
yoğunluk:	8700 kg/m <sup>3</sup>
malzeme:	Altın
elastisite modülü:	70e9 Pa
poisson oranı:	0.44
yoğunluk:	19300 kg/m <sup>3</sup>
malzeme:	Silikon
elastisite modülü:	131e9 Pa
poisson oranı:	0.27
yoğunluk:	2330 kg/m <sup>3</sup>

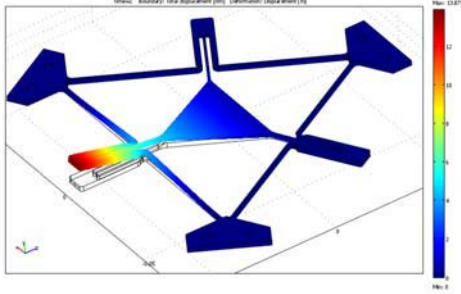
## 3. Tartışma

Metodoloji kısmında bahsedilen simülasyonlar gerçekleştirildikten sonra gerekli sonuçları elde etmek için bir dizi işlem daha uygulandı.

İlk olarak uygulanan kuvvetin kuvvet kolu hareketine olan bağıntısı ortaya çıkarıldı. Bu sayede malzeme etkisi de denklemlere eklenmiş oldu. Daha sonra, girdi olarak kabul edilen tahrik kollarındaki yer değiştirme değerleri ve çıktı olarak kabul edilen konumlandırıcı yüzeyinin yer değiştirme

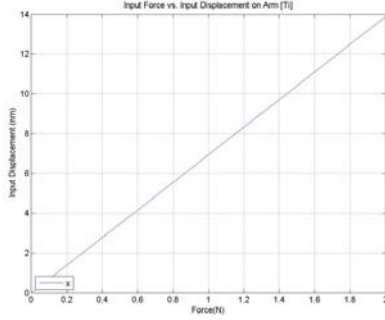
değerleri dönme etkisini de kapsayacak şekilde ilişkilendirildi. Bu çalışma ayrıca eşleştirme işleminin doğrusallığını denetleme imkanı da sunacaktır.

Son olarak çeşitli modellerle üst üstelik ilkesi kontrol edilecektir. Sonuçları yorumlamada kolaylık olması açısından ilk olarak 1 numaralı kola kuvvet uygulanmış ve 5. Resimde görünen sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5: Yer değiştirme grafiği

Kuvvet uygulanan tahrik kolu üzerindeki noktalardan toplanan verilerin MATLAB koduna aktarılmasıyla, uygulanan kuvveti yer değiştirmeye oranlayan grafik elde edilmiştir (Resim 6)..



Şekil 6: Kuvvet-Yer değiştirme Grafiği

Resim 6'da görüldüğü üzere tahrik koluna uygulanan düzgün artışı bir kuvvetin ortaya koyduğu yer değişim doğrusal bir davranış sergilemektedir. Sadece %0.04509'luk bir sapma kaydedilmiştir ve göz ardı edilebilir değerlerde kaldığı gözlemlenmiştir. Tablo 4'te farklı malzemeler için hesaplanan kuvvet-yer değiştirme eğimleri incelenebilir.

Tablo 4: F/d değerleri

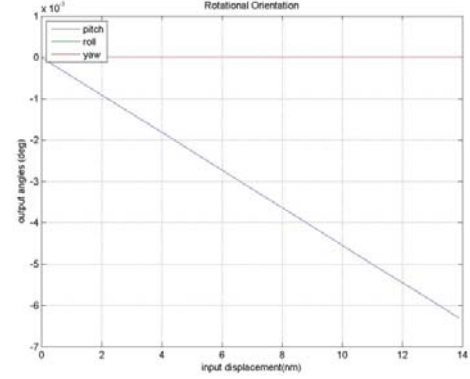
Malzemeler	E	$\nu$	$m=F/d$
Titanyum	105e9 Pa	0.33	0.14486 ( $\frac{nm}{N}$ )
Aluminyum	69e9 Pa	0.33	0.095193 ( $\frac{nm}{N}$ )
Silikon	131e9 Pa	0.27	0.18449 ( $\frac{nm}{N}$ )
Bakır	110e9 [Pa]	0.35	0.1508 ( $\frac{nm}{N}$ )
Altın	70e9	0.44	0.093304 ( $\frac{nm}{N}$ )

Bu sonuçlara göre metaller için eğim elastisite modülüyle ters orantılı olarak değişim göstermektedir. Öte yandan ametal silikonun malzeme olarak kullanıldığı simülasyonlarda eğimi elastisiteyle bağdaştırın hiçbir oran bulunamamıştır.

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{E_2}{E_1} \quad (7)$$

Asıl bulunması hedeflenen bağıntı, tahrik kolundaki yer değiştirmeyi konumlandırıcı yüzeyinin yer değişimine eşleştiren bağıntıdır. Tüm açı ve konum değerleri için çeşitli modeller kullanılmıştır. Resim 7; yunuslama, yalpa ve devrilme açılarının koldaki kaydırma bağlı olarak değişiminin grafiğidir. Tek koldan tahrik incelendiği için baskın açı yunuslama açısıdır. Y yönündeki yer değişimi kayda değer tek yer değişim olarak ortaya çıkmıştır ve en fazla 2mm yükselme olduğu gözlemlenmiştir. Grafiklerden hesaplanan eğimden aşağıdaki katsayı elde edilmiştir

$$r_1 \times k_p = \phi \Rightarrow k_p = 454.2 \times 10^{-6} (\frac{\circ}{nm}) \quad (8)$$



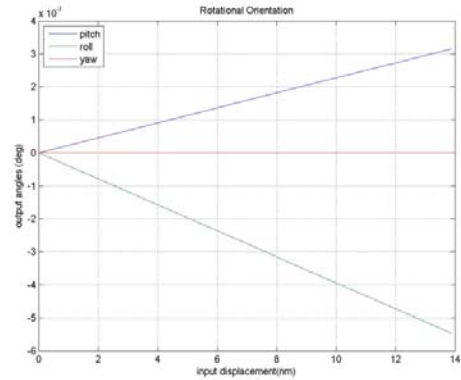
Şekil 7: 1. koldan tahrik sonuç grafiği

Aynı kuvvetin 2. kola uygulanması durumunda meydana gelecek sonuçlar daha farklı olacaktır. Merkez koordinat sisteminin yerleşimi nedeniyle oluşacak hareket yunuslama ve devrilmenin birleşimi şeklinde gözlemlenecektir. Resim 8'i oluşturan bilgilere dayanarak devrilme ve yunuslama için katsayılar aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$(r_2 \times k_p) + (r_2 \times k_r) = \phi + \theta$$

$$k_p = 227.26 \times 10^{-6} (\frac{\circ}{nm}),$$

$$k_r = 393.52 \times 10^{-6} (\frac{\circ}{nm}) \quad (9)$$



Şekil 8: 2. koldan tahrik sonuç grafiği

3. koldan da kuvvet uygulanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlardaki ufak oynamalar örgülemeledeki duyarlılık yetersizliğinden kaynaklanmaktadır.

$$(r_3 \times k_p) + (r_3 \times k_r) = \theta + \phi$$

$$k_p = 399.16 \times 10^{-6} (\text{°/nm}),$$

$$k_r = 235.13 \times 10^{-6} (\text{°/nm}) \quad (10)$$

Bir başka veri kümesi de 2. ve 3. kollardan zıt yönlerde uygulanan kuvvetlerin ortaya koyduğu sonuçlar için toplanmıştır. Bu kuvvet formasyonunda, aşağıdaki kat sayıya bağlı, z ekseninde salt bir dönme hareketi oluşmuştur.

$$r_{2,3} \times k_r = \theta \Rightarrow k_r = 778.63 \times 10^{-6} (\text{°/nm}) \quad (11)$$

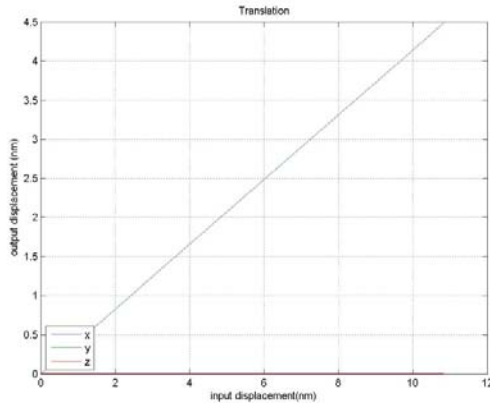
Tutarlılık analizi amacıyla bütün kollara uygulanan kuvvetlerin farklı zaman aralıkları için aldıkları değerleri birbirleriyle karşılaştırma yoluna gittik. Bu durumda 2. kola 1.2N kuvvet uygulandığı anda (1.2. saniyede) 0.0038 derecelik bir devrilme açısı gözlemlenirken tahrik kolundaki ötelenme miktarı y yönünde 8.3186nm olarak ölçülmektedir. 2. ve 3. koldan zıt kuvvetler uygulandığı takdirde aynı devrilme açısının elde edildiği değer 0.6N-0.8N ve 3.956-6.184 nm ötelenme aralıklarında çıkmaktadır. Çözünürlüğü arttırmak amacıyla aynı simülasyonu 0.1'lik zaman aralıklarıyla tekrar çalıştırıp 0.7N kuvvet uygulandığında 0.003895 derecelik bir devrilme açısı elde edildiği ortaya çıkmıştır. Daha ileri analizlerle bulunan veriler ışığında farklı kollardan kuvvet uygulanması durumunda oluşan devrilme açısı aşağıdaki denklem ile ilişkilendirilebilir.

$$\frac{k_{r_{2-3}}}{k_{r_2}} = \frac{F_{2-3}}{F_2} \quad (12)$$

Dikey kuvvetler için toplanan son veri kümeleri üst üstelik kuramının denenmesi için kullanılmıştır.

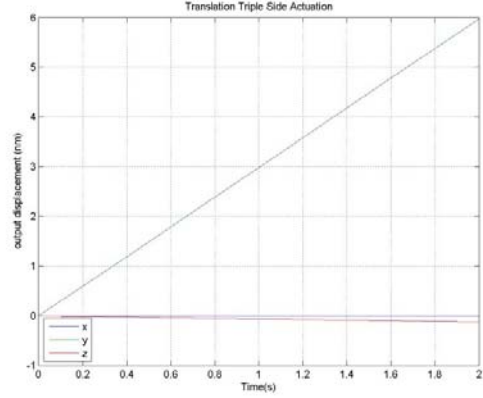
İlk olarak, üç koldan da eşit kuvvetin uygulanmasıyla Resim 9'da görünen salt y-ekseninde meydana gelen yer değişim incelenmiştir. Aralarındaki katsayı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$r_{1,2,3} \times k_y = y \Rightarrow k_y = 414.32 \times 10^{-3} (\text{°/nm}) \quad (13)$$

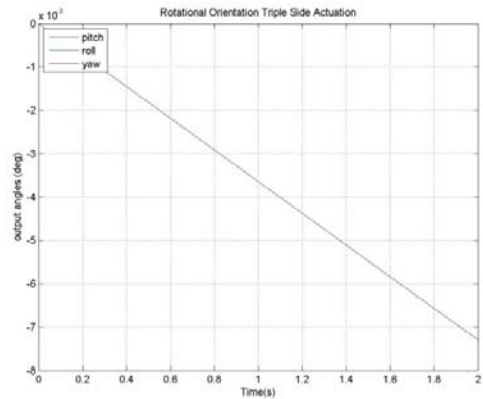


Şekil 9: Eş kuvvetli üç koldan tahrik

Üst üstelik özelliğini test etmek amacıyla 1. kola 2\*t N büyüklüğünde bir kuvvet uygulanırken diğerlerine 1\*t N uygulanmıştır. Bu şekilde uygulanan kuvvetlerin verdiği sonuçlar daha önce elde edilen tek koldan ve üç koldan tahrik verilerinin toplamıyla bağlantılı çıktığı takdirde üst üstelik kuramının geçerliliği kanıtlanmış olacaktır.



Şekil 10: Üst üstelik kuramında ötelenme



Şekil 11: Üst üstelik kuramında dönme

Yürütülen simülasyonlar sonucunda ortaya çıkmıştır ki, üst üstelik kuramı, yani kuvvete bağlı oluşan konumlandırılmaların ayrı ayrı toplanmasıyla aynı anda uygulanmasının benzer sonuçlar vermesi durumu, sadece öteleme durumu için geçerlidir.

Dönme hareketlerinde (yalpa, yunuslama, devrilme) ise üst üstelik sadece belli bir hareket temel alınarak uygulanabilir. Birden fazla hareket analiz edildiğinde doğrusal olmayan terimler denklemlere dahil olacak ve dördüncü dereceden çentik düzeltme faktörü, stress yoğunluk faktörü gibi sabitleri içeren bir yapıya bürünecektir. Bu denklem konumlandırıcının temel denklemlerinden aşağıdaki gibi oluşturulabilir.

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{6.73379 \times Ebt^4}{\left(\frac{2.7t + 5.4R}{8R + E} + 0.325E_t\right) \times 6KL^2} \quad (14)$$

Görüldüğü üzere bu denklemde 'k' katsayısı kullanılan maddenin stres-gerilim grafiğine bağlı olarak değişmektedir ve doğrusal olmayan bir davranış göstermektedir. Bu nedenle aradaki bağıntıyı herhangi bir sabitle ifade etmek mümkün olmaz. Sonuç olarak üst üstelik kuramının konumlandırıcıya bütünüyle uygulanmadığını söyleyebiliriz.

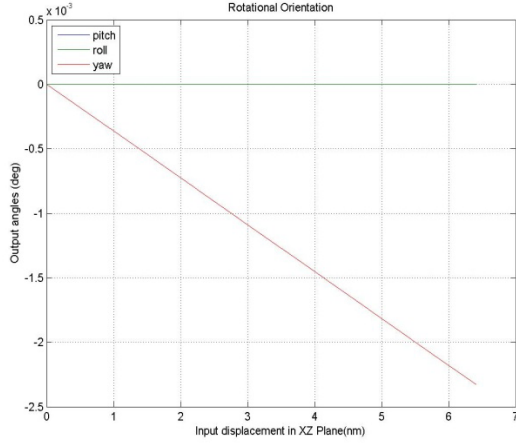
Metodolojinin son aşamasında teğet kuvvetler uygulanarak yalpa hareketinin özellikleri incelenmiştir. Tam y ekseninden geçen bir dönme hareketi elde etmek için üç kola birden eşit teğet kuvvet uygulanmıştır ve analizin kolaylığı açısından sonuçlar kısmında sadece bu durum değerlendirilecektir.

Teğet kuvvetlerin uygulanması durumunda sıkıntı yaratan olay, uygulanan kuvvet vektörünün x ve z olmak üzere iki



farklı bileşenden oluşuyor olmasıdır. Bu sorunu aşmak için ikisinin bileşke vektörü girdi değerleri olarak alınmıştır. Salt yalpa hareketini girdilere ilişkilendiren katsayı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$r_{1,2,3} \times k_y = \psi \Rightarrow k_y = 778.63 \times 10^{-6} \left( \frac{\circ}{nm} \right) \quad (15)$$



Şekil 12: Eş kuvvetle üç koldan dönme hareketi

#### 4. Sonuç

Herşeyin giderek küçülen ölçeklere sığdırıldığı günümüzde, yürüttüğümüz çalışmadan çıkarılacak sonuç: belvermeye dayalı konumlandırıcı sayesinde istenen 4 eksenli hareket 0.1N - 2N büyüklüğündeki kuvvetlerle ortalama  $1e^{-6}$  derece ve  $1e^{-12}$  metre çözünürlüğünde elde edilebilir. Bu kuvvet değerleri piyasadaki çoğu piezo-konumlandırıcının konumlandırıcı tasarımına uyarlanabileceği ölçeklerdedir.

Aslında çalışmamızın kilit noktası 4-eksene sahip üçgenel bir koordinat sistemini evrensel 3 eksenli koordinat sistemine eşlemektir. Bu bağlamda COMSOL ve MATLAB arasında veri işleme teknikleri kullanılarak ve örgüleme kalitesini arttırarak tutarlı sonuçlar elde edildi.

Bunların da ötesinde konumlandırıcı mekanizmanın farklı malzemelere karşı gösterdiği tepkileri de inceleme fırsatı bulduk ve metallerin doğrudan elastikiyet modülüne bağlı olarak benzer tepkiler verdiğini inceledik. Öte yandan ametaller için herhangi bir sonuca ulaşamadık.

Ayrıca farklı kollardan uygulanan kuvvetlerin yarattığı etkilerin incelenmesiyle konumlandırıcının kontrol edilebilmesi için gerekli temel denklemlerin elde edilmesine çalışıldı. Buna ek olarak üst üstelik kuramının geçerliliği de test edilip konumlandırıcımıza uygulanamadığı sonucuna varıldı.

Yürüttüğümüz simülasyonlar sırasında konumlandırıcının açılma hareketlerindeki parazitik hata payının konumlandırıcı yüzeyinin  $1e^{-3}$  seviyesinde bir öteleme hareketi yapıyor olmasından kaynaklandığını keşfettik ve bu ötelenmeyi de hesaplamalarımıza eklemeye karar verdik. Böylece ortaya çıkan çözüm yöntemi bir çok belvermeye dayalı konumlandırıcının hareketlerinin analizine uygulanabilecek bir yöntem oldu. Konumlandırıcının koordinat sistemi ötelenme sonrası ölçülen noktaya taşınarak ve son veriler ışığında açılma yönelimi de hesaplanarak girdiler ve çıktılar arasında eşleme yapılması olanaklı hale gelmiştir.

#### 5. Teşekkür

Bu çalışmada bizden yardımlarını sakınmayan hocalarımız Volkan Patoğlu ve Güllü Kızıldaş Şendur'a ve asistanımız Ahmet Fatih Tabak'a teşekkür ederiz. Ayrıca aynı konuyu yönetimde daha detaylı bir biçimde bitirme projesi olarak yaptığım sevgili hocam Asif Şabanoviç'e teşekkürü bir borç biliriz.

#### 6. Kaynakça

- [1] M. W. Spong, M. Vidyasagar 'Robot Dynamics and Control', 1989, ISBN: 0-471-61243-X
- [2] Bending. (2007, May 27). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 18:54, June 21, 2007, from <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bending&oldid=133759121>
- [3] A.G. Erdman, G.N. Sandor, Sridhar Kota, 'Mechanism Design - Analysis and Synthesis', 2001, ISBN: 0-13-040872-7
- [4] Shigley, Joseph Edward, 'Mechanical engineering design', 2001, ISBN: 071181865  
Young's modulus. (2007, June 14). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 18:54, June 21, 2007, from [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Young%27s\\_modulus&oldid=138083331](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Young%27s_modulus&oldid=138083331)
- [5] Strength of materials. (2007, June 20). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 18:55, June 21, 2007, from [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Strength\\_of\\_materials&oldid=139436749](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Strength_of_materials&oldid=139436749)