Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 28(1), 9-17, 2022

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Düz ve rijit cisim ile temas halindeki elastik kiriş dizininin konstrüksiyonel parametrelerinin sürtünme kuvvetine etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of structural parameters of elastic beam array in contact with smooth and rigid body on friction force

Turgay ERAY[1*]

[1]Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın, Türkiye.
turgay.eray@adu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 13.02.2020 Düzeltme Tarihi/Revision: 29.06.2021 doi: 10.5505/pajes.2021.35478
Kabul Tarihi/Accepted: 23.07.2021 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Günümüzde yüzey desenleme, temasta olan iki cisim arası temas kuvvetlerinin düzenlenmesinde önemli bir yöntem haline gelmiştir. Yüzey desenleme işlemi genellikle elastik silindirik kirişler kullanılarak yapılır. Bu çalışmada, elastik kiriş dizininin konstrüksiyonel parametrelerinin; kiriş dizininin düz, pürüzsüz ve rijit bir cisim ile arasındaki sürtünme kuvvet genliğine etkisi sonlu-elemanlar metodu ile incelenmiştir. Bunun için, elastik silindirik kiriş dizinlerinin sürtünmeli hareketi sonlu-elemanlar tabanlı mühendislik programında oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Bu modelde elastik kiriş dizinindeki destek katman kalınlığı, iki kiriş arası uzaklık ve kiriş sayısı değiştirilmiştir. Düz ve rijit bir cisim ile temasta olan kirişlerin tam-kaymalı sürtünmeli hareketindeki normal ve sürtünme kuvvet genlikleri hesaplanmıştır. İki kiriş arası uzaklık ya da kiriş destek katman kalınlığı arttırıldığında sürtünme kuvvet genliğinde azalma meydana gelmekte olup; kiriş sayısının tek bir kiriş başına düşen sürtünme kuvvet genliğine etkisi ihmal edilebilir seviyededir.

Anahtar kelimeler: Elastik kiriş dizini, Konstrüksiyonel parametre, Sürtünme kuvveti, SEM.

Abstract

Nowadays, surface texturing becomes a significant method in the regulation of contact forces between two bodies in contact. Surface texturing is generally carried out by using elastic cylindrical beams. In this study, the effect of elastic beam array structural parameters on friction force amplitude of beams in contact with a flat, smooth and rigid body are investigated by finite-element method. For this, the frictional motion of the elastic cylindrical beam array is modeled in a finite-element based engineering software. Validation of the established model is performed. In the model, backing layer thickness, spacing distance between two beams, and number of beams are changed in elastic beam array. Normal force and friction force amplitudes in the full-sliding frictional motion of beams in contact with a smooth and rigid body are calculated. When the spacing distance between the two beams or the beam backing layer thickness is increased, the friction force amplitude decreases; and the effect of the number of beams on the friction force amplitude per single beam is negligible.

Keywords: Elastic beam array, Structural parameters, Friction force, FEM.

1 Giriş

Sürtünme olayı mühendislik uygulamalarında önemli bir yer teşkil etmektedir. Sürtünme, iki cismin birbirine göre izafi hareketi esnasında ortaya çıkmaktadır. Sisteme verilen ya da sistemdeki enerjinin bir kısmı sürtünme ile kaybolmaktadır. Buna ek olarak sürtünme sonucu ile aşınma meydana gelmektedir. Bu yüzden, mühendislik uygulamalarındaki sürtünmenin sebebi [1]-[3], sürtünme kuvvetini ve aşınmayı azaltıcı yöntemler araştırma konusu olmuştur [4]-[6]. Bu yöntemlerden bilindiği üzere birisi yağlamadır; fakat yağlamanın istenmediği durumlarda sürtünme kuvvetini azaltıcı yöntemlerden biri olabilecek araştırma konusu, yüzey desenlemedir [7]-[13].

Yüzey desenleme, birbiri ile temas eden yüzeylerin en az bir yüzeyinde farklı geometri ve boyutlarda parça çıkarılması ya da yüzeye parça eklenmesi ile gerçekleştirilir. Eklenti yapılarak gerçekleştirilen yüzey desenleme işleminde, temas ara yüzündeki kuvvetlerin bu eklentili yapılara dağıtılması sağlanmış olur. Genellikle, bu tür eklenecek yapılar elastik malzemelerden imal edilirler ve silindirik kiriş şeklindedirler. Böylece yüzey üzerine eklenecek kirişlerin geometrisi, sayısı ve boyutları ile oynanmasının, temas kuvvetlerinin değiştirilmesine olanak sağladığı görülmüştür [14]-[19].

Literatürde, yüzey desenlemede kullanılan elastik silindirik kirişlerin adezyon ve sürtünme kuvveti üzerine çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda; kirişlerin boyu, çapı, boy-çap oranı gibi konstrüksiyonel parametrelerin temas kuvvetlerine etkileri incelenmiştir [20]-[22]. Tek bir kirişe ait konstrüksiyonel parametrelerin kirişin düz, pürüzsüz ve rijit bir yüzeyle yaptığı temas kuvvetlerinin değişimi literatürde mevcuttur. Buna ek olarak kirişlerin üzerinde bulunduğu destek katman kalınlığının; kirişlerin düz, pürüzsüz ve rijit bir cisim ile arasındaki adezyon temas kuvvetine etkisinin olduğu deneysel olarak gösterilmiştir [23]. Sonuçta artan destek katman kalınlığı ile adezyon kuvvetinde azalma meydana gelmiştir [23],[24]. Ancak, kiriş dizinindeki destek katman kalınlığının sürtünme kuvvetine etkisi literatürde eksik olup çalışılması gerekmektedir.

Kiriş dizinindeki temas kuvvetlerine etki eden diğer konstrüksiyonel parametre iki kiriş arası uzaklıktır. İki kiriş arası uzaklığın değiştirilerek adezyon temas kuvvetinin değiştirilebildiği sayısal olarak gösterilmiştir [25]. Bu olay, elastik destek katmanı üzerinden iki kirişin birbirini etkilemesi

*Yazışılan yazar/Corresponding author

sonucunda olmaktadır [25],[26]. Bunun neticesinde, iki kiriş arası uzaklığın değiştirilerek; kirişlerin düz, pürüzsüz ve rijit bir yüzey ile yaptığı tam-kaymalı hareketindeki sürtünme kuvvetinin de değiştirebilir olduğu düşünülmektedir. Sonuçta, iki kiriş arası uzaklığın sürtünme kuvvetine etkisi bu çalışmada incelenmiştir.

Kiriş dizinindeki diğer konstrüksiyonel parametre ise kiriş sayısıdır. Genellikle, kirişlerin konstrüksiyonel parametrelerinin adezyon ve sürtünme kuvveti üzerine etkisi doğrudan kiriş sayısı yerine temas alanı ile ilişkilendirilmiştir [27]. Bu çalışmada her ne kadar kiriş sayısının artması ile temas alanında artış olsa dahi, kiriş dizinindeki kiriş sayısı ile sürtünme kuvvetinin doğrudan bir ilişkisinin olup olmadığı incelenmiştir.

Bu çalışmada, elastik silindirik kirişlerin düz, pürüzsüz ve rijit bir cisim arasındaki sürtünme kuvvetinin; kiriş dizininin konstrüksiyonel parametreleri ile değişimi sayısal olarak incelenmiştir. Kiriş dizini ile karşıt yüzeyin arasındaki sürtünmeli hareket, sonlu-elemanlar tabanlı mühendislik programında oluşturulmuştur. Bu modelin doğruluğu, literatürdeki tek bir elastik kiriş için kurulan analitik model [28] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Doğrulanan model ile kiriş dizininin destek katman kalınlığı, iki kiriş arası uzaklığı ve kiriş sayısı değiştirilerek; bu konstrüksiyonel parametrelerin kiriş dizininin düz, pürüzsüz ve rijit bir cisim ile arasında oluşan sürtünme kuvvet genliğine etkisi incelenmiştir.

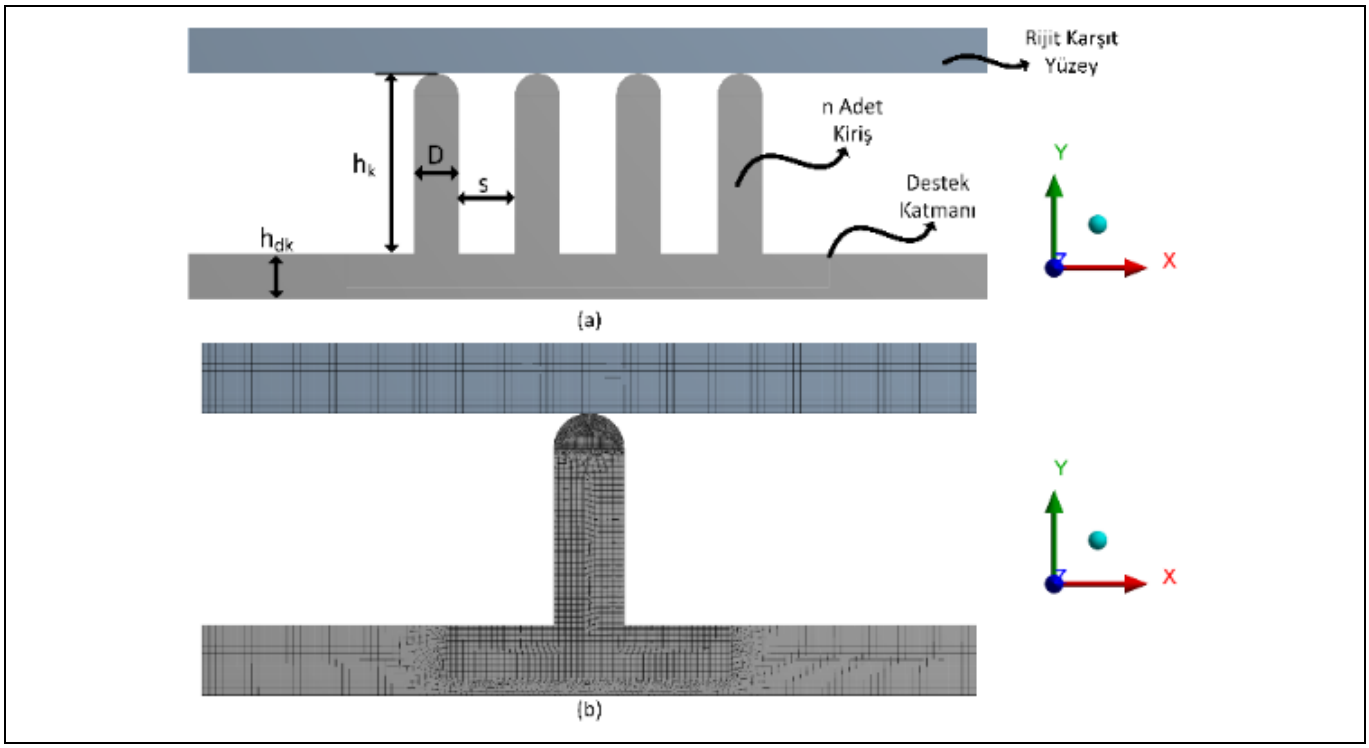
2 Materyal ve yöntem

Kiriş dizininin konstrüksiyonel parametrelerinin sürtünme kuvvetine etkileri, kirişlerin bulunduğu destek katman kalınlığı, iki kiriş arası uzaklık ve kirişlerin sayısı değiştirilerek incelenmiştir. Bunun için farklı kiriş dizinleri ile karşıt yüzey arasındaki sürtünmeli hareket sonlu-elemanlar tabanlı mühendislik programı (ANSYS R19) kullanılarak elde edilmiştir. Konstrüksiyonel parametreler Tablo 1'de verilmiş ve Şekil 1(a)'da gösterilmiştir. Sonlu-elemanlar tabanlı mühendislik programında oluşturulan modelde bir kiriş içeren kiriş dizinine ait ağ yapısı ise Şekil 1(b)'de verilmiştir.

Tablo 1. Kiriş dizinindeki konstrüksiyonel parametreler.

Table 1 Constructional parameters of beam array.

Konstrüksiyonel Parametre	Sembol
Kiriş sayısı	n
Kiriş çapı	D
İki kiriş arası uzaklık	s
Kiriş boyu	h_k
Destek katman kalınlığı	h_{dk}
Kiriş boy-çap oranı	$AR\ (h_k/D)$



Şekil 1(a): Tablo 1'de tanımlanan kiriş dizinine ait konstrüksiyonel parametreler. (b): Tek bir kiriş ile karşıt yüzeyin sonlu-elemanlar tabanlı mühendislik programında benzetim modelindeki ağ yapısı.

Figure 1(a): The constructional parameters of beam array defined in Table 1. (b): The mesh structure of a single beam and the counter surface in the simulation model in the finite-element based engineering software.

2.1 Sürtünme kuvvetinin elde edilmesi

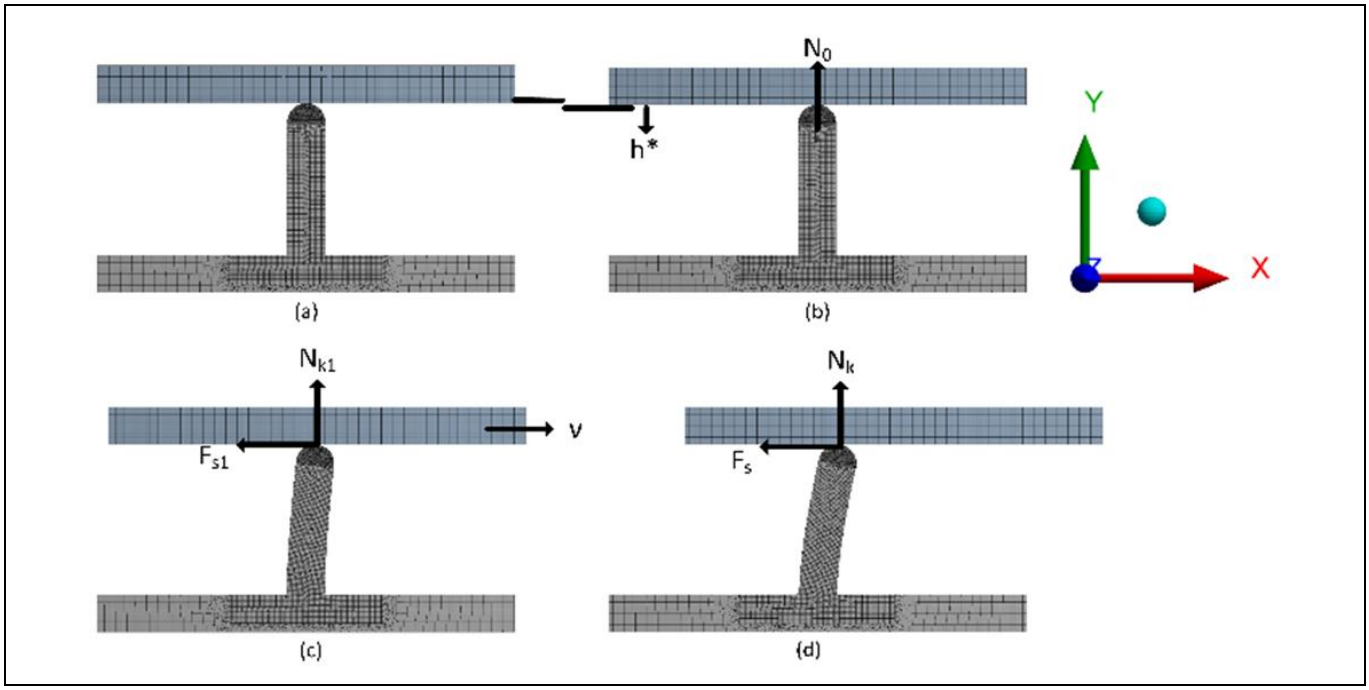
Şekil 2(a)'da ağ yapısı gösterilen, sonlu-elemanlar tabanlı mühendislik programındaki modelde, sürtünme kuvvetinin elde edilmesi şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

- Şekil 2(a)'da gösterildiği üzere karşıt yüzey ile kiriş arasında ilk başta temas bulunmakta olup, temastaki normal kuvvet (**y** ekseni yönündeki kuvvet) $N_0 = 0$ N'dir,
- Şekil 2(b)'de gösterildiği gibi karşıt yüzeye **-y** yönünde kiriş ile yüzey arasında N_0=10 mN'lik bir ön-yük oluşturulacak şekilde düşey hareket (**h***) verilir. Ön-yük oluşturulurken karşıt yüzeyin **x** ekseni yönündeki çizgisel hareketi ile **z** ekseni etrafındaki dönme hareketi sıfır olacak şekilde kısıtlanmıştır,
- Karşıt yüzey ile kiriş arasında istenilen genlikte ön-yük oluşturulduktan sonra, karşıt yüzeye **+x** yönünde v=1 mm/sn.'lik bir hız ile 2 mm'lik yanal hareket verilir. Buradaki verilen yanal hareket genliği ile kirişin tam-kayma [29] hareketine geçmesi hedeflenmektedir. Bu esnada karşıt yüzeyin **y** eksenindeki kirişi sıkıştırma miktarı (**h***) sabit tutulur. Şekil 2(c)'de gösterildiği üzere kiriş ile karşıt yüzey arasındaki normal kuvvet, karşıt yüzeyin yanal hareketi esnasında N_0 değerinden N_{k1} değerine azalır. Bu hareket sırasında kiriş ile karşıt yüzey arasında sürtünme kuvveti meydana gelir, F_{s1}. Bu sürtünme kuvveti Amontons' sürtünme kanununa göre modellenmiştir ve bir sabit ile tanımlanmıştır: Amontons' Sürtünme Katsayısı, μ.,
- Sürtünme kuvveti eşik değere geldiği zaman kiriş tam-kayma hareketine geçer [29],[30], Şekil 2(d). Kirişin tam-kayma hareketi esnasında temas kuvvetleri sabit kalmaktadır [22],
- Oluşturulan model ile normal kuvvet (N_k) ve sürtünme kuvveti (F_s) hesaplanmıştır.

Kiriş dizinlerine ait konstrüksiyonel parametrelerinin değerleri ve bunlar ile oluşturulan benzetim setleri Tablo 2'de verilmiştir.

2.2 Modelin doğrulanması

Koç ve Eray [28] tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada, yarı küresel uca sahip tek bir kirişin düz, pürüzsüz ve rijit bir yüzey ile yaptığı sürtünmeli hareketin denklemi analitik olarak modellenmiştir. Analitik model deney sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmada sonlu-elemanlar tabanlı mühendislik programında oluşturulan modelin doğrulanması, o çalışmada kurulan analitik modelin çözülmesi ile elde edilen sonuçlar kullanılarak sağlanmıştır.



Şekil 2. Sürtünme kuvveti elde edilmesi için koşturulan modeldeki kiriş ve karşıt yüzeyin hareketi. (a): Kiriş ile karşıt yüzeyin ilk temas durumu ve temas kuvveti $N_0 = 0$ N. (b): Karşıt yüzey **h*** kadar **-y** yönünde hareket verilerek kiriş sıkıştırılır ve N_0 ön-yük değeri elde edilir. (c): Karşıt yüzeyin kirişi **h*** sıkıştırma miktarı sabit tutulur ve karşıt yüzeye **+x** yönünde v=1 mm/sn hızla hareket girdisi verilerek sürtünme kuvveti elde edilir F_s.(d): Sürtünme kuvvet değeri eşik değerine gelince kirişte tam-kayma hareketi oluşur [29],[30]. Bu hareket sırasında sürtünme kuvveti (F_s) ile normal kuvvet (N_0) sabit değerde kalır [22].

*Figure 2. The motion of the beam and the counter surface in the model to calculate the friction force. (a): Initial contact state of the beam and the counter surface, and the contact force is N_0= 0 N. (b): The beam is compressed by moving the counter surface in the **-y** direction with a compressive displacement of **h***, and N_0 preload value is obtained. (c): The friction force F_s is obtained by supplying a motion input to the counter surface with a velocity of v=1 mm/s in the **+x** direction while keeping the compressive displacement of the counter surface h* constant. (d): When the friction force value reaches the threshold value, full-sliding motion of the beam occurs [29], [30]. During the full-sliding motion of beam, the friction force (F_s) and the normal force (N_0) remain constant [22].*

Tablo 2. Kiriş dizini konstrüksiyonel parametrelerinin değerleri ve benzetimdeki setler.

Table 2. Numerical values of constructional parameters of beam array, and sets in the simulations.

Setler	Konstrüksiyonel Parametre	D (mm)	s (mm)	h_k (mm)	h_{dk} (mm)	n (adet)	AR (aspect ratio) (boy/çap oranı)
Destek katman kalınlığı (Set-H)		1	-	3 4 5	0.25 0.50 1.00 1.25 1.50	1	3 4 5
İki kiriş arası uzaklık (Set-S)		1	0.25 0.50 0.75 1.00 1.25	3 4 5	1	4	3 4 5
Kiriş sayısı (Set-N)		1	0.25 0.75 1.25	3 4 5	1	1 2 4 6 8	3 4 5

Kiriş için elastik malzeme olan Polidimetilsiloksan (PDMS) ile karşıt yüzey için rijit bir malzeme kullanılmış olup, kullanılan malzemelere ait fiziksel büyüklüklerin değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Kiriş dizinindeki konstrüksiyonel parametreler.

Table 3. Constructional parameters of beam array.

Fiziksel Büyüklükler	Kiriş	Karşıt Yüzey
Young modülüs	2.3 MPa	70 GPa
Poisson oranı	0.499	0.28
Yoğunluk	970 kg/m³	2800 kg/m³

Benzetim sonuçları ile analitik model çözümü sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. Bu çalışmada oluşturulan modeldeki sonuçların doğrulanması için üç farklı boy-çap oranına (AR: 3, 4, 5) sahip tek bir kiriş kullanılmıştır. Her iki modelde de kiriş ile karşıt yüzey arasındaki Amontons' sürtünme katsayısı μ=1 olarak alınmıştır. 10 mN ön-yük değerinde oluşturulan sürtünme kuvveti ve normal kuvvet değerleri kullanılmıştır. Analitik ve sayısal sonuçların arasındaki relatif hata Denklem (1)'de tanımlanmıştır.

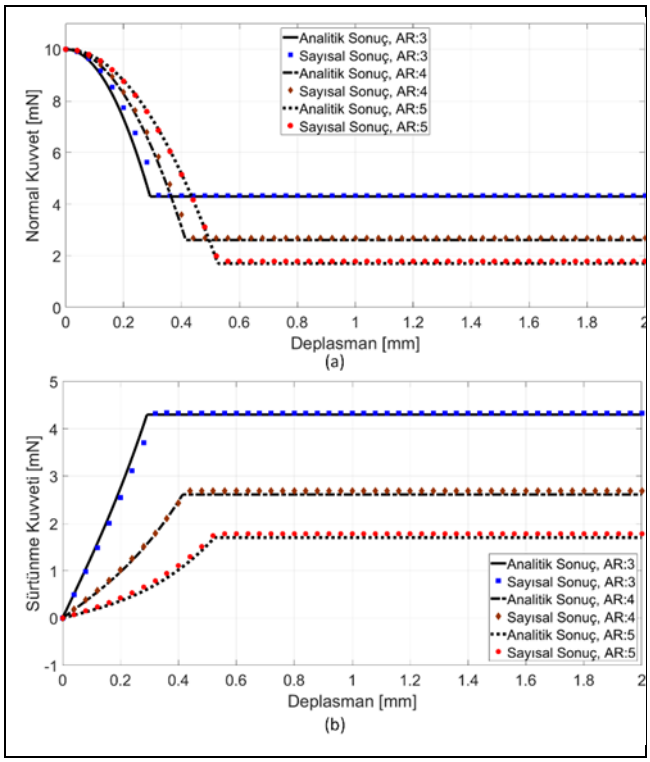
$$Hata = \frac{Analitik - Sayısal}{Analitik} x\ 100 \qquad (1)$$

Sonuçlardan da görüldüğü gibi, sonlu-elemanlar tabanlı mühendislik programında oluşturulan model, deneysel olarak doğrulanmış analitik model ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Şekil 3 ve Tablo 4'te verilen karşılaştırmalı sonuçlar; bu çalışmada oluşturulan modelin, kiriş dizini konstrüksiyonel parametrelerinin sürtünme kuvvet genliği üzerine etkisinde kullanılabilirliğini desteklemektedir.

Tablo 4. Sayısal ve analitik model arasındaki relatif hata değeri.

Table 4. Relative error between numerical and analytical model.

Boy/Çap Oranı	Normal Kuvvette Hata (%)	Sürtünme Kuvvetinde Hata (%)
AR:3	-0.790	-0.790
AR:4	-2.912	-2.912
AR:5	-4.876	-4.876



Şekil 3. Oluşturulan modelin; yarı küresel uca sahip, üç adet farklı boy-çap oranındaki (AR: 3, 4, 5) tek bir kirişin, 10 mN ön-yük altındaki normal. (a): ve sürtünme kuvveti (b): Değişiminin sayısal ve analitik sonuçlar ile doğrulanması.

Figure 3. Verification of the model by comparison of numerical and analytical results of the variation of normal. (a): and friction force. (b): Under 10 mN preload of a single beam with hemispherical tip and three different aspect ratios (AR: 3, 4, 5).

Farklı ön-yük kuvvet değerlerine göre de benzetim sonuçları doğrulanmıştır. Ön-yük kuvveti (N_0) Euler burkulma kuvvetine (N_{kr}) [31] göre normalize edilmiştir. Euler burkulma kuvveti ise şu şekilde hesaplanır: $N_{kr} = \eta \frac{\pi^2 EI}{L^2}$. Burada, η sınır koşullarına ait sabit, E, I ve L kirişe ait Young modülüsü, alan

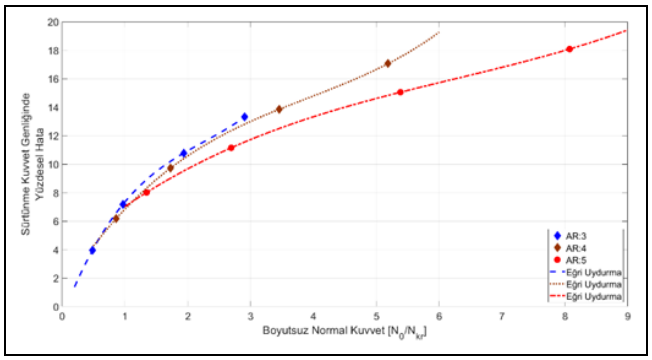
atalet momenti ve kirişin boyunu temsil etmektedir. Bu çalışmada η =0.25 olarak alınmıştır. Farklı boy-çap oranlarına sahip kirişlerin Euler burkulma kuvveti Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Farklı boy-çap oranına sahip kirişlerin Euler burkulma kuvveti, N_{kr}.

Table 5. Euler buckling load of beams with different aspect ratios, N_{kr}.

Boy/Çap Oranı	Euler Burkulma Kuvveti [mN]
AR:3	41.27
AR:4	23.12
AR:5	14.85

Denklem (1) kullanılarak, sayısal ve analitik sonuçlardaki sürtünme kuvvet genliği arasındaki relatif hata yüzdesel olarak elde edilmiştir. Şekil 4'te sürtünme kuvvet genliğindeki hata farklı boy-çap oranlarına sahip kirişler için verilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi, ön-yük kuvveti Euler burkulma kuvvetine yakınlaştıkça relatif hata her bir kiriş için artmaktadır. Ön-yük kuvveti burkulma kuvvetine eşit olduğunda %6-8 arası relatif hata elde edilmiştir. Ön-yük değeri daha da arttırıldıkça relatif hata miktarı %20'lere kadar çıkmaktadır.



Şekil 4. Yarı küresel uca sahip, üç adet farklı boy-çap oranındaki (AR: 3, 4, 5) tek bir kirişin, farklı ön-yük kuvvet değerlerine göre sayısal ve analitik sonuçlar arasında, Denklem (1) kullanılarak hesaplanan sürtünme kuvvetindeki relatif hata.

Figure 4. Relative error in calculated friction force by using Equation (1), between numerical and analytical results under different preload values of a single beam with hemispherical tip and three different aspect ratios (AR: 3, 4, 5).

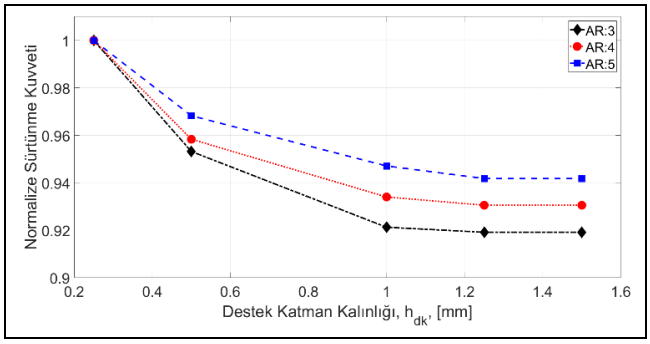
Sonuç olarak, bu çalışmadaki sonlu-elemanlar tabanlı mühendislik programındaki modelde Euler burkulma kuvvetinden daha az bir ön-yük kuvvet ile benzetim gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde her bir kiriş için ön-yük, en düşük burkulma kuvvetine sahip AR:5 kirişe ait burkulma kuvveti N_{kr} =14.85 mN değerinden daha az olan N_0 =10 mN olarak seçilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Benzetim modelinin koşturulması sonucunda elde edilen sürtünme kuvvet genlikleri, her bir kiriş dizini seti (Set-H, Set-S, Set-N) içerisinde en yüksek kuvvet genliğine göre normalize edilerek verilmiştir.

3.1 Kiriş dizini destek katman kalınlığının sürtünme kuvvet genliğine etkisi, Set-H sonuçları

Şekil 5'te destek katman kalınlığına göre sürtünme kuvvet genliği değişimi en yüksek kuvvet genliğine göre normalize edilerek verilmiştir. Destek katmanının kalınlığı 0.25 mm'den 1.5 mm'ye arttırıldığında, sürtünme kuvvet genliği de 1'den 0.92 ile 0.94 değerine azalmıştır. Kim ve diğ. [23] çalışmasında, poliüretandan imal edilen kiriş dizinindeki destek katman kalınlığının adezyon kuvvetine etkisi deneysel incelenmiş olup, destek katman kalınlığının artması sonucu adezyon kuvvetinde azalma meydana getirmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada destek katman kalınlığı arttırıldığında, sürtünme kuvvet genliğinde azalma meydana geldiği gösterilmiştir.



Şekil 5. Farklı boy-çap oranlarına sahip tek bir kirişin, 10 mN ön-yük altında hesaplanan normalize edilmiş sürtünme kuvvet genliğinin destek katman kalınlığına (h_{dk}) göre değişimi.

Figure 5. Variation of the calculated normalized friction force amplitude with respect to the backing layer thickness (h_{dk}) under 10 mN preload of a single beam with different aspect ratios.

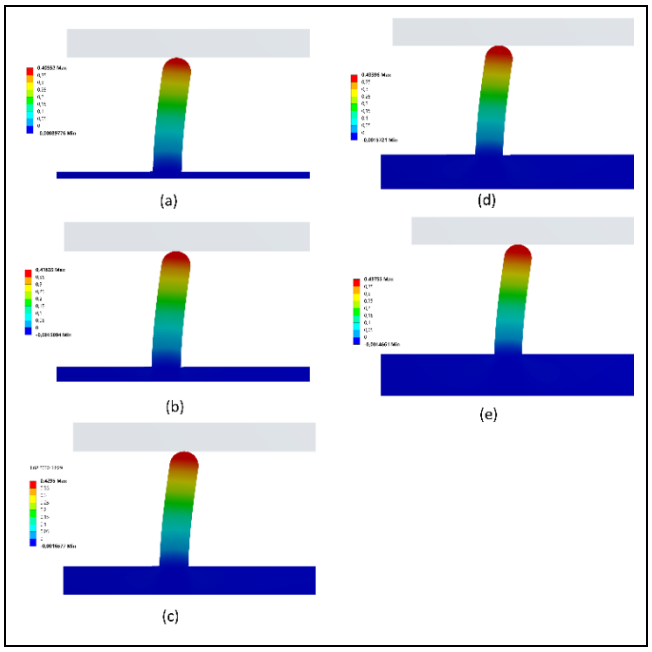
Kirişlerin düz ve rijit bir cisim arasındaki sürtünmeli hareketinde sürtünme kuvvetinin genliğinin, eğilme rijitliği ile hesaplanabileceği analitik ve deneysel çalışmalarda gösterilmiştir [22],[28]. Aynı zamanda, destek katmanına sahip kirişlerde eğilme rijitliğine, kirişin eğilme rijitliği ile destek katmanının eğilme rijitliğinin katkısı bulunmaktadır. Eşdeğer eğilme rijitliği, kiriş ve destek katmanının seri bağlı iki elastik yay olarak modellenmesi ile şu şekilde hesaplanabilir:

$$k_e = \left(\frac{1}{k_k} + \frac{1}{k_{dk}}\right)^{-1} \quad (2)$$

Burada, k_e, k_k, k_{dk} sırası ile eşdeğer eğilme rijitliğini, kirişin ve destek katmanının eğilme rijitliklerini belirtmektedir. Destek katmanının kalınlığı arttıkça eğilme rijitliği azalmakta olup [31], sonucunda kiriş ile destek katmanının eşdeğer eğilme rijitliği de azalmaktadır. Sürtünme kuvvet genliği eğilme rijitliği ile bağıntılı olduğundan [22], destek katman kalınlığının arttırılması ile eşdeğer eğilme rijitliği azalmakta olup sürtünme kuvvet genliğinin azalması bu şekilde izah edilmektedir. Eşdeğer eğilme rijitliği de, sürtünme kuvvet genliği ve kirişte meydana gelen eğilme deformasyonundan Hooke kanununa göre yaklaşık olarak şu şekilde hesaplanabilir:

$$k_e = \frac{F_s}{x_k}. \quad (3)$$

Denklem 3'te k_e eşdeğer eğilme rijitliği, F_s sürtünme kuvvet genliğini, x_k ise kirişteki tam-kayma hareketindeki maksimum elastik deformasyonu (kiriş ucundaki elastik deformasyon) temsil etmektedir. Şekil 6'da sayısal sonuçlardan elde edilen kirişlere ait elastik deformasyon miktarları gösterilmiştir.



Şekil 6. Farklı destek katman kalınlığına (h_{dk}) sahip boy-çap oranı 4 olan tek bir kirişin tam-kaymalı hareketi esnasında kirişte oluşan elastik deformasyon miktarı (x_k); (a) h_{dk} =0.25 mm, (b) h_{dk} =0.50 mm, (c) h_{dk} =1.00 mm, (d) h_{dk} = 1.25 mm, (e) h_{dk} =1.5 mm.

Figure 6. The elastic deformation of a single beam (x_k) with an aspect ratio of 4 and different backing layer thickness (h_{dk}) during the full-sliding motion of the beam; (a) h_{dk}=0.25 mm, (b) h_{dk}=0.50 mm, (c) h_{dk}=1.00 mm, (d) h_{dk}= 1.25 mm, (e) h_{dk}=1.5 mm.

Tablo 6'da da sürtünme kuvvet genlikleri ve elastik deformasyon miktarları sonuçları ile Denklem 3 kullanılarak hesaplanan eşdeğer eğilme rijitlikleri verilmiştir.

Tablo 6. Eşdeğer eğilme rijitliğinin destek katman kalınlığına göre değişimi.

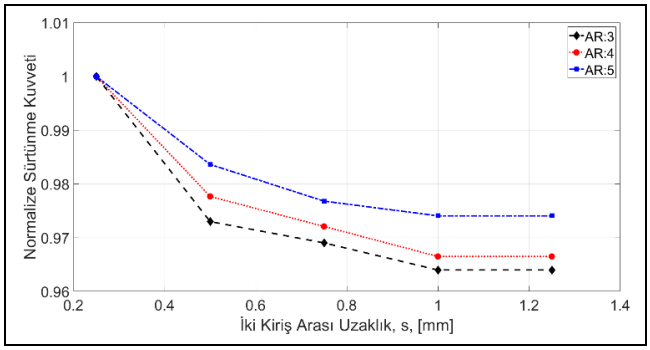
Table 6. Variation the equivalent bending stiffness with respect to backing layer thickness.

Destek katman kalınlığı [mm]	Sürtünme kuvvet genliği [mN]	Kirişteki elastik deformasyon [mm]	Denklem 3'e göre Eşdeğer eğilme rijitliği [mN/mm]
0.25	2.8763	0.4055	7.0928
0.50	2.7587	0.4163	6.6259
1.00	2.6856	0.4295	6.2528
1.25	2.6794	0.4336	6.1795
1.50	2.6798	0.4375	6.1253

Her ne kadar kirişlerdeki destek katman kalınlığının artması ile sürtünme kuvvet genliğindeki azalma kirişler için aynı karakteristikte olsa dahi farklı boy-çap oranlarında farklı azalma meydana gelmiştir. Bu azalma miktarı AR:3 boy-çap oranına sahip kiriş için %6, AR:4 olan kiriş için %7 ve AR:5'e sahip kiriş için %8 olarak gerçekleşmiştir. Aynı çap fakat farklı boylardaki (boy-çap oranı değişmekte) tek bir kirişin eğilme rijitliği kiriş boyu ile 3. mertebeden değişmektedir [31]. Aynı çapa sahip kirişte kiriş boyu azaldıkça (boy-çap oranı düşürüldükçe) kirişin eğilme rijitliği artmaktadır. Bu da her ne kadar destek katman kalınlıkları aynı olsa da, boy-çap oranı azaldıkça kirişin, kiriş dizininin eşdeğer eğilme rijitliğine katkısı daha da artmaktadır. Farklı boy-çap oranındaki kirişlerdeki sürtünme kuvvet genliklerindeki farklı azalma miktarının sebebi, kirişlerin eğilme rijitliği kiriş boyunun 3. mertebesi ile değiştiğinden, eşdeğer eğilme rijitliklerine katkısının farklı olması sebebi ile izah edilebilir. Buna ek olarak, belirli bir destek katmanı kalınlığından itibaren, sürtünme kuvvet genliği sabit değere yakınsamaktadır. Koç ve Akça [26] çalışmalarında, piezoelektrik malzemesine sahip destek katmanı üzerindeki PDMS malzemesinden yapılan kirişlerin, destek katmanındaki elektriksel potansiyelin destek katmanı kalınlığı ile değişimini incelemiştir. Bu çalışmadaki ile benzer bir sonuç elde edilmiştir. Destek katman kalınlığın artması ile elektriksel potansiyelin PDMS kiriş dizininden bağımsız bir hale geleceği yani sabit bir değere yakınsadığı ve kirişlerin birbirlerinin etkisinin azalacağı gösterilmiştir.

3.2 İki kiriş arası uzaklığın sürtünme kuvvet genliğine etkisi, Set-S sonuçları

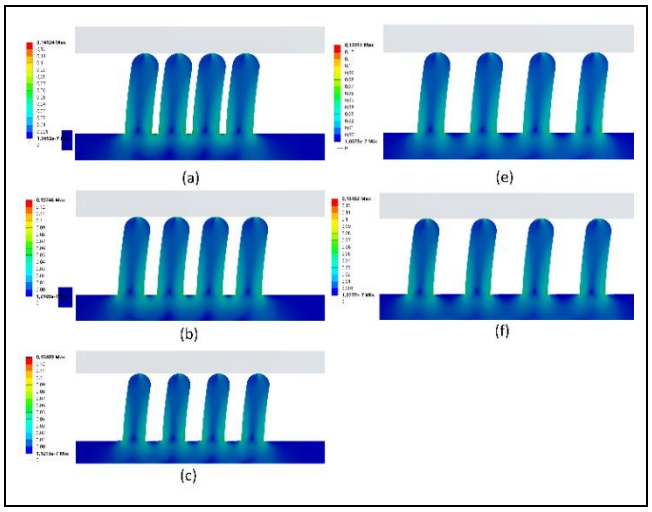
Bu kısımda; sabit kiriş çapı, boyu ve destek katman kalınlığına sahip 4 adet kiriş içeren kiriş dizinlerindeki iki kiriş arası uzaklık değiştirilmiştir. Sürtünme kuvvet genliği bu set içerisindeki en yüksek kuvvet genliğe göre normalize edilmiştir. Şekil 7'de sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 7. Farklı boy-çap oranlarına sahip tek bir kirişin, 10 mN ön-yük altında hesaplanan normalize edilmiş sürtünme kuvvet genliğinin iki kiriş arası uzaklığa (s) göre değişimi.

Figure 7. Variation of the calculated normalized friction force amplitude of a single beam with different aspect ratios under 10 mN preload value, with respect to the spacing distance (s) between two beams.

İki kiriş arası uzaklığın azalması sonucunda, sürtünme kuvvet genliğinde artış meydana gelmiştir. İki kiriş arası uzaklık 0.25 mm'den 1.25 mm'ye arttırıldığında, sürtünme kuvvet genliğinde %2.5 ile %3 oranında azalma meydana gelmiştir. Su ve diğ. [32] çalışmasında, vakumlu ortamda sayısal ve deneysel olarak iki kiriş arası uzaklığın teğetsel adezyon katsayısını temas alanı ile ilişkilendirerek değiştirdiği gösterilmiştir. Bu çalışmada ise iki kiriş arası uzaklığın kirişler arası etkileşimi ile sürtünme kuvvetinin değiştiği sayısal olarak gösterilmiştir. Buna uygun, kiriş dizinindeki kirişlerin etkileşimini Şekil 8'de, maksimum kayma gerilmesi sonuçları kullanılarak gösterilmiştir. Bu sonuçlarda, iki kiriş arasında uzaklık azaldığında, kirişler arası etkileşimin arttığı kayma gerilme sonuçlarından görülmektedir. İki kiriş arası uzaklığı arttırarak, kirişlerin birbirinden etkilenmemesi ve neticesinde kiriş dizinini ayrıştırma (decoupling) işlemi gerçekleştirilebilir. Bu kapsamda, sürtünme kuvvet genliği üzerine olmayan bir çalışmada kiriş dizinlerindeki iki kiriş arası uzaklığın kritik bir değeri olduğu ve bu değerden sonra kirişlerin birbirini etkilemediği gösterilmiştir [26].

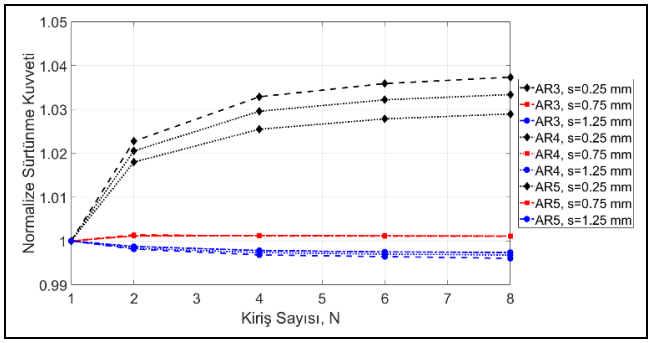


Şekil 8. Farklı iki kiriş arası uzaklığa (*s*) sahip boy-çap oranı 4 ve 4 kiriş içeren kiriş dizinin tam-kaymalı hareketi esnasında kirişte oluşan maksimum kayma gerilme miktarı; (a): s=0.25 mm, (b): *s*=0.50 mm, (c): *s*=0.75 mm, (d) *s*=1.00 mm, (e): *s*=1.25 mm.

Figure 8. The maximum shear stress value that occurs in the beam during the full-sliding of the beam array containing 4 beams with an aspect ratio of 4 and different spacing distance (s) between two beams; (a): s=0.25 mm, (b): s=0.50 mm, (c): s=0.75 mm, (d: s=1.00 mm, (e): s=1.25 mm.

3.3 Kiriş sayısının sürtünme kuvvetine etkisi, Set-N sonuçları

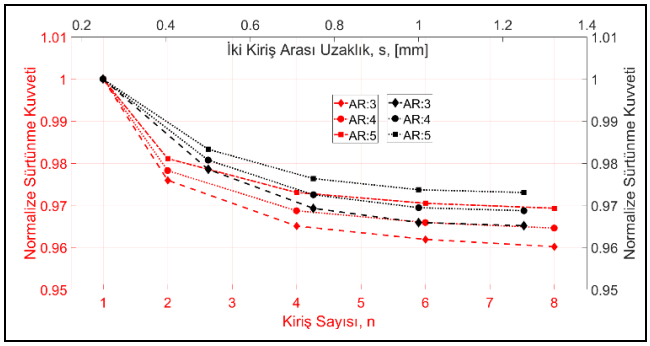
Bu kısımda; sabit kiriş çapı, boyu ve destek katman kalınlığına sahip farklı sayıda kiriş içeren kiriş dizinlerindeki sürtünme kuvvet genliği kiriş sayısına bölünerek, tek bir kirişe gelen sürtünme kuvvet genliği elde edilmiştir. Şekil 9'da tek bir kirişte oluşan sürtünme kuvvet genlik sonuçları yer almaktadır.



Şekil 9. Farklı boy-çap oranlarına sahip farklı sayılarda kiriş barındıran kiriş dizininde, 10 mN ön-yük altında elde edilen sürtünme kuvvet genliğinin kiriş sayısına (*n*) bölünerek elde edilen tek bir kirişteki normalize sürtünme kuvvet genliğinin kiriş sayısına göre değişimi.

Figure 9. Variation of normalized friction force amplitude of a single beam with respect to number of beams, calculated by dividing the friction force amplitude obtained under 10 mN preload by the number of beams (n), in a beam array containing different numbers of beams and aspect ratios.

Bu sonuçlardan görüldüğü gibi, kiriş sayısının değiştirilmesinin tek bir kiriş üzerine etkisi ihmal edilebilecek seviyededir. Ancak, iki kiriş arası uzaklığın bir miktar etkisi görülmektedir. İki kiriş arası uzaklığın *s*=0.25 mm olduğu durumda tek bir kiriş başına düşen sürtünme kuvvet genliği kiriş sayısı ile beraber %5 oranında artmıştır. İki kiriş arası uzaklık azaltıldığında sürtünme kuvvet genliğinde artış meydana geldiği sonuçlardan görülmüştü. Tek bir kirişe düşen sürtünme kuvvet genliğinde artış, iki kiriş arası uzaklık azaltılması nedeni ile olup olmadığı araştırılmıştır. Şekil 10'da kiriş sayıları aynı olan fakat iki kiriş arası uzaklığın değiştirilmesi ile elde edilen tek bir kirişe gelen sürtünme kuvvet genliği sonuçları ile Şekil 7'deki sonuçlar beraber verilmiştir. Sonuçtan görüldüğü gibi, kiriş sayısı ve iki kiriş arası uzaklık değiştirilmesi ile hesaplanan sürtünme kuvvetindeki değişim aynı karakteristiğe sahiptir. Sonucunda, kiriş sayısı arttıkça her ne kadar sürtünme kuvveti artsa da, kiriş başına düşen sürtünme kuvvet miktarında değişim ihmal edilebilir düzeydedir. Ayrıca, kirişlerin hepsinin karşıt yüzey ile temasta olduğu yani temassız kirişin olmadığı ve her bir kirişteki temas alanın aynı olduğu kabul edilirse; bir çalışmada silindirik kirişler için sürtünme kuvvetinin temas alanı ile doğrusal olarak değiştiği deneysel olarak gösterilmiştir [27]. Kiriş sayısının etkisinin ihmal edilebilir olması neticesinde, her bir kiriş özdeş olarak imal edilebilirse, tek bir kirişin sürtünme kuvveti hesabı ile kiriş dizininin sürtünme kuvveti hesabında kiriş sayısı kullanılabilir.



Şekil 10. Farklı boy-çap oranlarına ve farklı iki kiriş arası uzaklığı sahip kiriş dizininde, 10 mN ön-yük altında elde edilen sürtünme kuvvet genliğinin kiriş sayısına (n) bölünerek elde edilen tek bir kirişteki normalize sürtünme kuvvet genliğinin kiriş sayısı ve iki kiriş arası uzaklığa göre değişimi. Kırmızı eksen ve sonuçlarda kiriş sayısı, siyah eksen ve sonuçlarda da iki kiriş arası uzaklık değiştirilmiştir.

Figure 10. Variation of normalized friction force amplitude of a single beam in beam arrays with different length-diameter ratios and distance between two beams with respect to the number of beams and the distance between two beams. The normalized friction force amplitude was calculated by dividing the friction force amplitude obtained under 10 mN preload with the number of beams (n). The number of beams in the red axis and results, the spacing distance between the two beams in the black axis and results were changed.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada elastik kiriş dizininin düz, pürüzsüz ve rijit bir cisim ile arasında meydana gelen sürtünmeli hareketi sonlu-elemanlar tabanlı mühendislik programında oluşturulmuştur. Oluşturulan model literatürdeki analitik model kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulanan model ile kiriş dizini destek katman kalınlığının, iki kiriş arası uzaklığının ve kiriş sayısının sürtünme kuvvet genliğine etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Şu sonuçlar çıkarılmıştır:

- İki kiriş arası uzaklığın artması sonucunda sürtünme kuvveti genliği azalmakta olup, kirişler arası etkileşim azalmaktadır,
- Kiriş destek katmanının kalınlığı azaltıldığında, eşdeğer eğilme rijitliği ve sürtünme kuvvet genliği artmaktadır,
- Kiriş sayısının tek bir kiriş başına düşen sürtünme kuvvet genliğine etkisi ihmal edilebilir seviyededir.

Tek bir kirişin sürtünme kuvveti hesaplanırsa kiriş dizininde konstrüksiyonel parametreler ile oynanarak, kirişler arası etkileşimin azaltılması ve kiriş sayısının değiştirilmesi ile sürtünme kuvvet genliğinin hesabı gerçekleştirilebilir. Böylece robotik uygulamalarda [33] istenilen sürtünme karakteristiğine ve kuvvet genliğine sahip kiriş dizini tasarımı yapılabilir.

5 Conclusions

In this study, the frictional motion between an elastic beam array and a flat, smooth and rigid body was modeled in a finite-element based engineering program. The model was validated using the analytical model in the literature. With the validated model, the effects of beam array backing layer thickness, spacing distance between two beams, and number of beams on friction force amplitude were numerically investigated. The following results were drawn:

- ✓ As the spacing distance between two beams increases, the coupling between the beams and the friction force amplitude decrease.
- ✓ Equivalent bending stiffness and friction force amplitude increase as the thickness of the beam backing layer is reduced.
- ✓ The effect of the number of beams on the friction force amplitude per single beam is negligible.

If the friction force of a single beam is calculated, the friction force amplitude can be calculated by changing the structural parameters in the beam array such as reducing the coupling between beams and changing the number of beams. Thus, beam array with desired friction characteristics and force amplitude can be designed in robotic applications [33].

6 Teşekkür

Bu çalışma Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinasyon Birimince desteklenmiştir. Proje Numarası: MF-19012.

7 Yazar katkı beyanı

Bu çalışmada Turgay ERAY fikrin oluşturulması, literatür taraması, kaynak temini, sonlu elemanlar tabanlı modelin kurulması ve doğrulanması, analizlerinin gerçekleştirilmesi, bulguların elde edilmesi ve tartışılması, makale yazımı ve makalenin son kontrolü başlıklarında katkı sunmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur ve makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

[1] Singer IL. "Friction and energy dissipation at the atomic scale: A review". *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Film*, 12(5), 2605-2616, 1994.

[2] Park JY, Salmeron M. "Fundamental aspects of energy dissipation in friction". *Chemical Reviews*, 114(1), 677-711, 2014.

[3] Hu R, Krylov SY, Frenken JW. "On the origin of frictional energy dissipation". *Tribology Letters*, 68(8), 1-13, 2020.

[4] Neville A, Morina A, Haque T, Voong M. "Compatibility between tribological surfaces and lubricant additives-how friction and wear reduction can be controlled by surface/lube synergies". *Tribology international*, 40(10-12), 1680-1695, 2007.

[5] Wong VW, Tung SC. "Overview of automotive engine friction and reduction trends-Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies". *Friction*, 4(1), 1-28, 2016.

[6] Ali A, Kamal M, Xianjun H, Essa FA, Abdelkareem MA, Elagouz A, Sharshir SW. "Friction and wear reduction mechanisms of the reciprocating contact interfaces using nanolubricant under different loads and speeds". *Journal of Tribology*, 2018. https://doi.org/10.1115/1.4039720

[7] Etsion I. "Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing". *Tribology Letters*, 17(4), 733-737, 2004.

[8] Etsion I. *Surface texturing for in-cylinder friction reduction*. Editor: Rahnejat H. Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain: Fundamentals, Applications and Future Trends, 458-469, Cambridge, UK, Woodhead Publishing, 2010.

[9] Wang ZW, Chen MW, Wu JW, Zheng HH, Zheng XF. "A review of surface texture of tribological interfaces". *In Applied Mechanics and Materials*, 37, 41-45, 2010.

[10] Tang W, Zhou Y, Zhu H, Yang H. "The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of steel under lubricated sliding contact". *Applied Surface Science*, 273, 199-204, 2013.

[11] Hsu SM, Jing Y, Hua D, Zhang H. "Friction reduction using discrete surface textures: principle and design". *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014. https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/33/335307

[12] Baharin AFS, Ghazali MJ, Wahab JA. "Laser surface texturing and its contribution to friction and wear reduction: a brief review". *Industrial Lubrication and Tribology*, 68(1), 57-66, 2016.

[13] Gachot C, Rosenkranz A, Hsu SM, Costa HL. "A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement". *Wear*, 372, 21-41, 2017.

[14] Murphy MP, Aksak B, Sitti M. "Adhesion and anisotropic friction enhancements of angled heterogeneous micro-fiber arrays with spherical and spatula tips". *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21(12-13), 1281-1296, 2007.

[15] Kim S, Aksak B, Sitti M. "Enhanced friction of elastomer microfiber adhesives with spatulate tips". *Applied Physics Letters*, 2007. https://doi.org/10.1063/1.2820755

[16] He B, Chen W, Wang QJ. "Surface texture effect on friction of a microtextured poly (dimethylsiloxane) (PDMS)". *Tribology Letters*, 31(3), 187-197, 2008.

[17] Kramer RK, Majidi C, Wood RJ. "Shear-Mode Contact Splitting for a Microtextured Elastomer Film". *Advanced Materials*, 22(33), 3700-3703, 2010.

[18] Murarash B, Itovich Y, Varenberg M. "Tuning elastomer friction by hexagonal surface patterning". *Soft Matter*, 7(12), 5553-5557, 2011.
[19] Brörmann K, Barel I, Urbakh M, Bennewitz R. "Friction on a microstructured elastomer surface". *Tribology Letters*, 50(1), 3-15, 2013.
[20] Greiner C, del Campo A, Arzt E. "Adhesion of bioinspired micropatterned surfaces: effects of pillar radius, aspect ratio, and preload". *Langmuir*, 23(7), 3495-3502, 2007.
[21] Aksak B, Hui CY, Sitti M. "The effect of aspect ratio on adhesion and stiffness for soft elastic fibres". *Journal of The Royal Society Interface*, 8(61), 1166-1175, 2011.
[22] Eray T, Sümer B, Koç İM. "Analytical and experimental analysis on frictional dynamics of a single elastomeric pillar". *Tribology International*, 100, 293-305, 2016.
[23] Kim S, Sitti M, Hui CY, Long R, Jagota A. "Effect of backing layer thickness on adhesion of single-level elastomer fiber arrays". *Applied Physics Letters*, 91(16), 161905-161907, 2007.
[24] Booth JA, Bacca M, McMeeking RM, Foster KL. "Benefit of backing-layer compliance in fibrillar adhesive patches-resistance to peel propagation in the presence of ınterfacial misalignment". *Advanced Materials Interfaces*, 2018. https://doi.org/10.1002/admi.201800272
[25] Bacca M, Booth JA, Turner KL, McMeeking RM. "Load sharing in bioinspired fibrillar adhesives with backing layer interactions and interfacial misalignment". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 96, 428-444, 2016.
[26] Koç İM, Akça E. "Design of a piezoelectric based tactile sensor with bio-inspired micro/nano-pillars". *Tribology International*, 59, 321-331, 2013.
[27] Degrandi-Contraires E, Poulard C, Restagno F, Léger L. "Sliding friction at soft micropatterned elastomer interfaces". *Faraday Discussions*, 156(1), 255-265, 2012.
[28] Koç İM, Eray T. "Modeling frictional dynamics of a visco-elastic pillar rubbed on a smooth surface". *Tribology International*, 127, 187-199, 2018.
[29] Maugis D. *Contact, Adhesion and Rupture of Elastic Solids*. 1st ed. Berlin, Germany, Springer, 2000.
[30] Johnson KL. *Contact Mechanics*. 1st ed. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1985.
[31] Timoshenko S, Goodier JN. *Theoy of Elasticity.* 3rd ed, New York, USA, McGraw-Hill, 1987.
[32] Su Y, Hou X, Jiang S, Li M, Liu Y, Chen W. "A study of the microstructure modification of a space crawling robot adhesive feet based on discrete element method". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019. https://doi.org/10.1007/s40430-019-2043-x
[33] Kim S, Spenko M, Trujillo S, Heyneman B, Santon D, Cutkosky MR. "Smooth vertical surface climbing with directional adhesion". *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 65-74, 2008.