

## KARAYOLU KÖPRÜ KİRİŞLERİNDE KULLANILAN ELASTOMER MESNETLERİN ŞEKİL ETKENİNİN MESNET İÇERİSİNDE OLUŞAN GERİLME DÜZEYLERİ ÜZERİNE ETKİSİ ve DAİRE ŞEKLİN SAĞLADIĞI YARARLAR

**Niyazi Özgür BEZGİN**

İstanbul Üniversitesi, Avcılar Yerleşkesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 34320,  
Avcılar, İstanbul/ Türkiye 212.473.7070 x 17947 E-mail: ozgur.bezgin@istanbul.edu.tr

### Özet

Elastomer köprü mesnetleri, çelik veya beton köprü kirişlerin mesnet noktalarında kullanılabilmektedirler. Çoğunlukla çelik levhalar ile katmanlı bir şekilde tasarlanan mesnetler mesnet noktalarında yatay düzlemde ortaya çıkan hareket gereksinimlerini karşılarken, düşey yükler altında gereken birim direnci de (stiffness) katmanlı yapıları sayesinde sağlamaktadırlar. Bu nedenle elastomer mesnetler, günümüzde inşa edilen karayolu köprülerinde veya köprü bakım ve yenileme çalışmalarında tercih edilmektedirler. Elastomer malzemeler, sıkıştırılmaz özellikleri ile şekil değiştirme serbestliğinin sınırlandırılma derecesine bağlı bir mekanik davranış içerisindedirler. Diğer yandan, kesitlerinin geometrik özelliklerine bağlı olan ve şekil etkeni (shape factor) ile tanımlanan özellikleri ile aynı kesit alanına sahip fakat farklı şekillere sahip elastomer mesnetler, üzerlerine etki eden düşey kuvvetler altında farklı davranmaktadırlar. ABAQUS programı ile gerçekleştirilen tetkik sonuçlarının sunulacağı çalışma içerisinde, dikdörtgen ve dairese kesitli katmanlı elastomer mesnetlerin düşey ve yatay yükler altında davranış farklılıkları irdelenecektir.

### Giriş

Elastomer köprü mesnetleri 1960'lardan beri artan sayılarda kullanılmaktadırlar. Kare, dikdörtgen ve daire olarak üretilen elastomer mesnetler, farklı toplam kalınlıklarda ve çelik veya lif katkılı malzemelerden imal edilmiş levhalar ile katmanlı olarak üretilmektedirler.

Köprü kirişlerinin düşey taşıyıcılar tarafından desteklendiği dayanak noktalarında kullanılan elastomer mesnetler, kirişlerin ısıl değişimlerden kaynaklı uzama ve kısalma ihtiyacını sağlamak, yükler altında eğilen bir kirişin mesnetinde ihtiyaç duyulan dönme hareketini sağlamak ve mesnet kuvvetini uygun gerilme değerine indirgeyerek düşey taşıyıcıya aktarmak için kullanılmaktadırlar. Bu bağlamda elastomer mesnetlerin kiriş boy eksenine ve beklenen mesnet hareketliliğine göre doğru biçimde konumlandırılmaları önemli bir uygulama sorunu teşkil etmektedir. Eğrilik içeren kirişlerin veya verevli köprü kirişlerinin mesnetleri üzerine etki edecek olan yatay kuvvetin doğrultusunu tam olarak tespit etmek gerekir. Zira tespit edilen bu hareket yönüne göre kare veya dikdörtgen mesnetlerin de asal eksenlerini, beklenen hareket doğrultusuna göre paralel konumlandırmak üzere düşey taşıyıcı yatay eksenlerine açısal olarak yerleştirilmeleri gerekir.

Bu durum uygulamada sorunlar doğurabilmektedir. Diğer taraftan dairesel mesnetlerin merkezinden geçen herhangi bir doğrunun, dairenin asal eksenini oluşu, dairesel mesnetlerin yerleşimini de kolaylaştırmaktadır.

ABD’ de 2001 senesinde eyaletler arasında yapılan bir anketi de içeren çalışmada (1) eyalet ulaştırma bakanlıklarının kullandıkları mesnet türleri ve yaşadıkları sorunlar sorgulanmıştır. Bu ankete göre tespit edilen ana sorunlar arasında, kare veya dikdörtgen mesnetlerin, yatay etkiler altında, mesnet asal eksenlerinden farklı ve beklenmedik yönlerde şekil değiştirebildikleri, metal levhalar ile katmanlar halinde desteklenmiş mesnetleri oluşturan metal ve elastomer katmanların ayrışabildikleri, kiriş sehimlerinin mesnetlerde yarattığı dönme etkileri altında mesnetlerin, asal eksenlerinden farklı eksenler etrafında dönerek ezilebildikleri ifade edilmiştir. Daire şeklinde elastomer mesnet kullanan az sayıda eyaletin isimleri ve bu eyaletlerin tercih ettikleri dairesel mesnet çapı ve kullanım yerleri Tablo 1’de belirtilmiştir. Şekil 1’ de, daire elastomer mesnet kullanımı görülmektedir. Daire elastomer mesnetlerin kare veya dikdörtgen mesnetlerden %10 kadar daha pahalı olabildiği belirtilmiştir.

Tablo 1. 2001 yılında daire elastomer mesnet kullandığını beyan eden eyaletler (1)

| Eyalet        | Çap        | Kalınlık     | Elastomer türü           | Köprü türü                                                         |
|---------------|------------|--------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Connecticut   | 60 cm      | 5 – 7,5 cm   | Neopren                  | Orta ve yüksek verev; 30 – 45 m açıklık                            |
| Idaho         | 30 – 60 cm | -            | Neopren                  | Yüksek verevli köprüler.                                           |
| Maine         | 30 – 60 cm | 2,5 – 10 cm  | Neopren                  | Yüksek verevli veya eğrili 30 m’den kısa köprüler.                 |
| Massachusetts | 30 – 60 cm | 7,5 – 7,5 cm | Polikloropren            | Yüksek verevli veya eğrili 30 m’den kısa köprüler.                 |
| New Hampshire | 30 – 90 cm | 5 – 10 cm    | Doğal kauçuk             | Çelik ve beton, yüksek verevli veya eğrili 30 m’den kısa köprüler. |
| New York      | 30 – 60 cm | -            | Neopren ve doğal kauçuk  | Yüksek verevli veya eğrilik içeren köprüler.                       |
| Texas         | 30 – 60 cm | 2,5 – 7,5 cm | Neopren ve polikloropren | Orta ve yüksek açılı veya eğrilik içeren 45 m’den kısa köprüler.   |



Şekil 1. Daire elastomer mesnet kullanımı (1).

Kare veya dikdörtgen mesnetlerde gözlenen sorunlar ve özellikle mesnetlerin beklenen hareket yönüne göre konumlandırılma zorlukları nedeniyle daire mesnetlerin değerlendirilmesi gündeme gelmiştir. Dairesel şeklin sunduğu kullanım ve yapısal yararlar nedeniyle de bugün ABD’de daire elastomer mesnetler yaygın olarak kullanılmaktadır. Sunulacak çalışma içerisinde mesnet geometrisine bağlı olarak mesnet içi gerilmelerin dağılımları ve değişimleri ile daire elastomer mesnetlerin kare ve dikdörtgen kesitlere göre farklılıkları irdelenecektir.

### Elastomerler

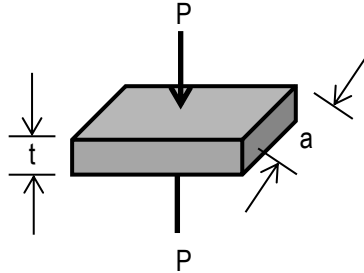
Elastomerler, çoğunlukla karbon ve hidrojen atomlarından oluşan, davranış özelliklerini değiştirmek için bazen de dolgu (filler) olarak adlandırılan atomlar içerebilen, birbirinden bağımsız çoklu moleküler zincirlerden (polymer) oluşmuş yapılardır. Vulkanizasyon olarak anılan ve yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen bir işlem ile bu zincirler arasında sülfür atomları ile bağlar kurulmakta ve böylece zincirlerin birbirleri üzerinden kaymaları engellenerek, etki eden kuvvetler altında birlikte davranmaları ve kuvvetin kaldırılmasının ardından yapının başlangıç haline ulaşması sağlanmaktadır. Polimer yapının uygulanan kuvvetler altında şekil değiştirebilirlik özelliği ortam sıcaklığına da bağlıdır. Çok düşük sıcaklıklarda polimer zincirlerinin esneyebilme özellikleri kaybolmakta ve amorf yapıda bir cam gibi kırılma göstermektedirler. Polimer yapının elastomer olarak anılabilmesi için bu zincirlerin kırılma davranış göstermemeleri gerektiği gibi, kuvvetler altında kalıcı şekil değişikliğine (plastik) uğramadan önce belirgin bir aralıkta geri kazanımlı (elastik) olarak esneyebilmeleri gerekir.

Elastomerler, sıkıştırılmaz (incompressible) özellikleri ile diğer katı malzemelerden ayrılırlar. Bir başka deyişle, uygulanan bir gerilim altında malzemenin kendi üzerine çökmesi ve yoğunluğunun değişmesi mümkün değildir.

Bu sayede elastomer bir yapının birim direncinin (stiffness) değiştirilmesi, malzeme özelliklerinin değiştirilmesinin yanında elastomerin yükler altında uğrayacağı hacimsel şekil değişikliği serbestliğinin sınırlandırılması ile de mümkün olabilmektedir. Öte yandan, aynı kesit alanına sahip ancak farklı kesit şekillerine sahip yapıların şekil değiştirebilen serbest alan değerleri de farklı olmaktadır. Bu farklılık nedeniyle de elastomer bir yapının davranışı, kesit şekline de bağlı olmaktadır. Elastomerlere has bu etki, “S: şekil etkeni (shape factor)” kapsamında ifade edilebilmektedir.

### Şekil etkeni

Elastomer yapının şekil etkeni, yapının yüke maruz kalan alanının, serbestçe şekil değiştirebilen alanına oranıdır. Örneğin, Şekil 2’ de sunulduğu gibi “t” kalınlığında ve “a” kenar ölçüsüne sahip kare bir elastomerin  $a^2$  alanına sahip yüzeyine “P” basınç kuvveti uygulanıldığında, elastomer yapının  $4 \cdot a \cdot t$  alanına sahip serbest kenar alanı, basınç altında sıkışma nedeniyle yanlara doğru açılarak şekil değişikliğine uğrayacaktır. Bu durumda kare elastomer yapının S değeri  $S_{\text{kare}} = a^2 / 4at = a / 4t$  olacaktır. Benzer bir değerlendirmeyi “D” yarıçapına sahip “t” kalınlıkta bir daire elastomer için yapacak olsak  $S_{\text{daire}} = (\pi D^2 / 4) / (\pi Dt) = D / 4t$  olacaktır.



Şekil 2. P kuvvetine maruz, “a” kenar ölçüsünde ve “t” kalınlığında kare elastomer mesnet.

Bu noktada, elastomer yapının kesit formunun şekil etkeni üzerindeki etkisi ortaya çıkmaktadır. Zira aynı kesit alanına ancak farklı kesit şekillerine sahip elastomer yapıların S değerleri de farklı olabilir.

Aynı alana sahip bir kare ile dairenin çevre uzunlukları kıyaslandığında dairenin çevresinin karenin çevresinin yaklaşık %88,6’sı olduğu görülür. Karenin bir kenarı “a” ve dairenin çapı D ise Eşitlik 1 ve 2’de sunulan ifadelerden bu oran ispatlanabilir.

$$\text{Daire alanı} = \text{Kare alanı} \rightarrow a^2 = \pi \cdot D^2 / 4 \rightarrow a = D\sqrt{\pi} / 2 \quad (1)$$

$$\text{Dairenin çevresi} / \text{Karenin çevresi} = \pi \cdot D / 4 \cdot a = \pi \cdot D / 2 \cdot D \cdot \sqrt{\pi} = 0,886 \quad (2)$$

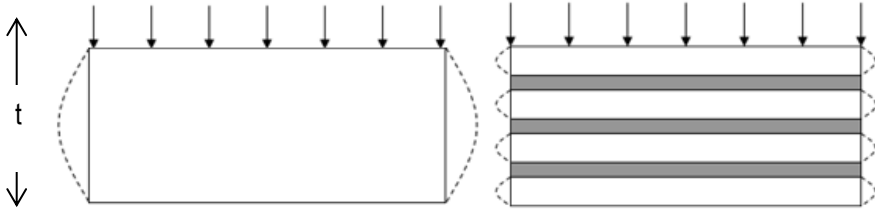
Bir bakıma daire şekli, kare şekline göre aynı değerde bir alanı %11,4 daha az çevre uzunluğu içerisinde kapsayabilen ve dolayısıyla kareye göre daha verimli bir geometrik şekildir. Örneğin,

bir arazinin kare olarak çevrenmesi için gereken çitin uzunluğu aynı arazinin daire olarak çevrenmesi için gereken çitin uzunluğundan yaklaşık %13 daha fazladır. İşte geometrik şekillerin bu farklılığı, elastomer malzeme ile mesnet tasarımında yapısal bir farklılık yaratmaktadır.

Şekil etkenini Eşitlik 3' de sunulduğu gibi tanımlayabiliriz:

$$\text{Şekil etkeni} = \frac{\text{Yüklenen alan}}{\text{Şekil değiştirebilen alan}} = \frac{\text{Yüklenen alan}}{\text{Çevre uzunluğu} \cdot \text{katman kalınlığı}} \quad (3)$$

Burada katman kalınlığı, serbest şekil değiştirebilen malzemeyi tanımlayan en büyük kalınlıktır. Örneğin Şekil 3' te sol tarafta sunulan ve levhalar ile katmanlaştırılmamış mesnetin "t" katman kalınlığı ile sağda sunulan katmanlı elastomer mesnetin "t" katman kalınlığı birbirinden farklıdır. Bu farklılıktan dolayı bu iki kesitin şekil etken değeri de birbirinden farklıdır. Şayet elastomer mesnetin yükler altında şekil değiştirmesi teorik olarak tamamen engellenebilse, bu durumda uygulanan yük altında mesnetin kısalması da mümkün olmayacaktır. Sıkıştırılmaz bir malzeme olarak elastomerin kendi üzerine çökmesi de söz konusu olamayacağına göre şekil değiştirmesi engellenmiş elastomer mesnetin uygulanan birim yüke karşı gösterdiği direnç de teorik olarak sonsuz olacaktır. Bu bağlamda elastomer malzeme, bir başka sıkıştırılmaz türde olan ve hidrolik sistemlerde sıklıkla kullanılan akışkan malzeme davranışı sergilemektedir.



Şekil 3. Katmansız elastomer (sol) ile katmanlı elastomer + levha mesnet (sağ) (2).

Eşitlik 1 ve 2'deki çözümlemelerden, bir dairenin çevresinin kendisiyle aynı alana sahip karenin çevresinin %88,6'ı olduğunu tespit etmiştik. Aynı alan ve kalınlıkta kare ve daire elastomer mesnetlerin şekil etken oranlarını Eşitlik 4' deki gibi kıyaslayabiliriz.

$$S_{kare} = \frac{\text{Kare alanı}}{\text{Kare çevresi} \cdot \text{Kare kalınlığı}}$$

$$S_{daire} = \frac{\text{Daire alanı}}{\text{Daire çevresi} \cdot \text{daire kalınlığı}} = \frac{\text{Daire alanı}}{0,886 \cdot \text{kare çevresi} \cdot \text{daire kalınlığı}}$$

$$\frac{S_{daire}}{S_{kare}} = \frac{1}{0,886} \sim 1,13 \quad (4)$$

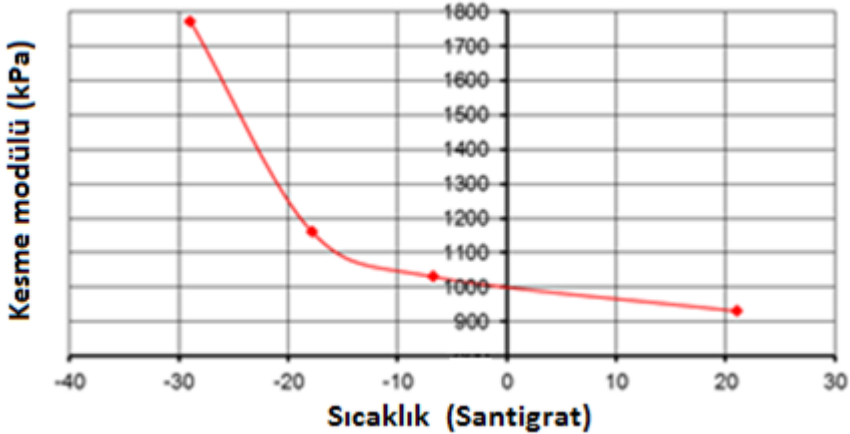
ASSHTO, elastomer malzemenin elastik modül değerinin, malzemenin kesme modül değeri, sertliği ve şekil etkeni ile ilişkisini Eşitlik 5' de sunulduğu gibi ifade etmektedir.

$$E = 3 * G * (1 + 2 * k * S^2) \quad (5)$$

Aynı alana sahip daire elastomer mesnetin aynı alana sahip kare veya dikdörtgen bir mesnede göre daha yüksek bir S değerine sahip olması daha yüksek bir "E" değerine ve dolayısıyla aynı basınç gerilmesi altında daha az sıkışacağı anlamına da gelir.

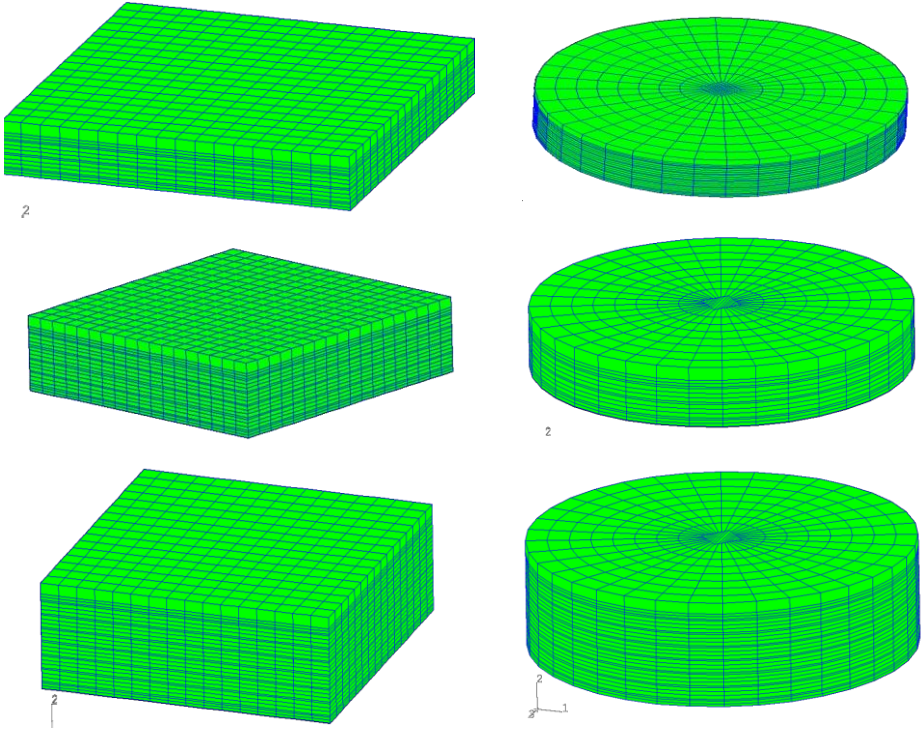
### Katmanlı elastomerler

Köprü kiriş mesnetlerine hareket kabiliyeti kazandırmak ancak düşey yükler altında kısalmalarını sınırlandırmak için çoğu zaman çelik levhalar ile kuvvetlendirilmiş katmanlı elastomer mesnetler kullanılır. Malzeme sertliğine ve ortam sıcaklığına bağlı olarak elastomerlerin kesme modülleri değişir. Bu bölümde sunulan analitik çalışmada CALTRANS tarafından sıklıkla kullanılan ve Şekil 4'de Shore-A 55 sertlik derecesinde neopren malzeme için sıcaklığa bağlı olarak kesme modül değişimi gösterilen elastomer malzeme ile 240 MPa akma gerilmesine sahip çelik levhalar kullanılmıştır. Kış koşullarında uygulamayı değerlendirerek elastomerin kesme modülü, modellerde -10°C' de 1150 kPa olarak seçilmiştir.



Şekil 4. Kesme modülünün ortam sıcaklığı ile değişimi (1).

Şekil 5'de sunulan, 3, 5 ve 7 katmanlı, kare ve daire olarak modellenen mesnetlerin kalınlıkları sırasıyla 4,5 cm; 7,6 cm ve 10,7 cm' dir. Kare mesnetin kenar ölçüsü 40,6 cm, daire mesnetin çapı ise 45,8 cm'dir. Tüm mesnetler, rijit bir üst başlık tarafından 115 Tonluk düşey kuvvet tarafından sağlanan 70 kg/cm<sup>2</sup> değerinde basınç gerilmesi altında incelenmektedirler. Katmanlı mesnetlerin elastomer tabaka kalınlıkları 13,5 mm'dir. Tablo 2'de ve Şekil 6'da, kurgulanan modeller üzerinden elde edilen kısalma değerleri sunulmaktadır. İrdelenen kesitlerin şekil etkenleri Eşitlik 6 ve 7 ile tespit edilmiştir.



Şekil 5. Yukarıdan aşağıya sırasıyla 3, 5 ve 7 katmanlı elastomer mesnetler (2).

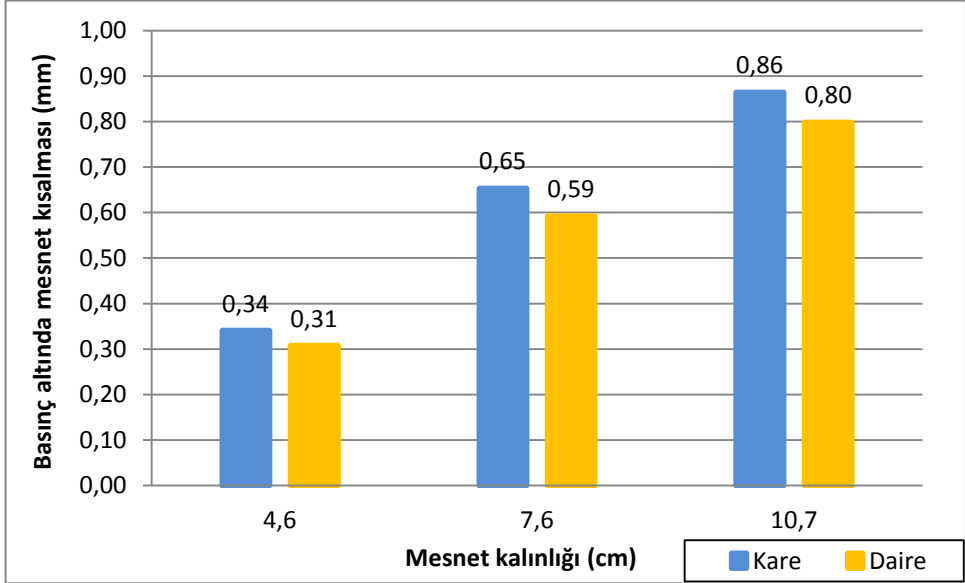
$$S_{kare} = 40,6^2 / 4 * 40,6 * 1,35 = 7,5 \quad (6)$$

$$S_{daire} = \frac{\pi * 45,8^2 / 4}{\pi * 45,8 * 1,35} = 8,5 \quad (7)$$

Şekil özellikleri nedeniyle artan şekil etkeni ve Eşitlik 5 uyarınca artan elastisite modülü nedeniyle daire mesnetlerde tespit edilen oturma değerleri kare mesnetlere göre ortalama %10 daha az olmuştur.

Tablo 2. -10°C'de ve 70 kg/cm<sup>2</sup> basınç gerilmesi altında değerlendirilen şartlar altında model üzerinden tespit edilen mesnet kısalmaları (2).

| Katman sayısı | Toplam mesnet kalınlığı (cm) | Kısılma değeri (mm) |       |
|---------------|------------------------------|---------------------|-------|
|               |                              | Kare                | Daire |
| 3             | 4,6                          | 0,34                | 0,31  |
| 5             | 7,6                          | 0,65                | 0,59  |
| 7             | 10,7                         | 0,86                | 0,80  |

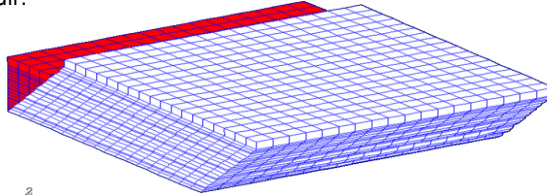


Şekil 6. Yukarıdan aşağıya sırasıyla 3, 5 ve 7 katmanlı elastomer mesnetler (2).

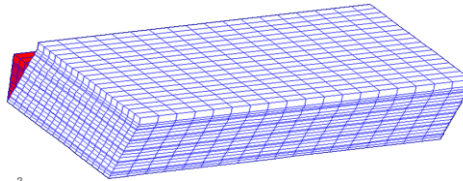
### Yatay yükler altında elastomer mesnet davranışı

Giriş bölümünde de ifade edildiği üzere, vevrevli köprülerde veya eğrilik içeren kirişlerin mesnetlerinde ısı değişimlerinden kaynaklı yatay hareketliliğin doğrultusunun tam olarak tespiti ve bu tespite göre mesnetin düşey kiriş taşıyıcısı üzerine konumlandırılması önemli bir uygulama adıımıdır. Zira mesnet konumlandırması, gerek mesnetin yatay yönde harekete zorlanmasının gerekse de sehim yapan kirişin mesnet noktasında oluşturacağı dönme etkisinin oluşturacağı iç gerilimlerin dağılımları ve değerleri üzerine etkisi olmaktadır. Daire mesnetin yatay kesit etrafında döngüsel özellikleri geometrik merkezinden geçen tüm eksenler etrafında aynıdır. Ancak kare ve dikdörtgen kesitin döngüsel özellikleri merkezinden geçen her eksen etrafında aynı değildir ve asal eksenleri etrafında tanımlanan sınır değerleri arasında değişkendir. Bu nedenle, asal eksenleri etrafında dönecek şekilde konumlandırılmamış mesnetlerde, tasarım aşamasında beklenmeyen gerilme değer ve dağılımların ortaya çıkması mümkündür.

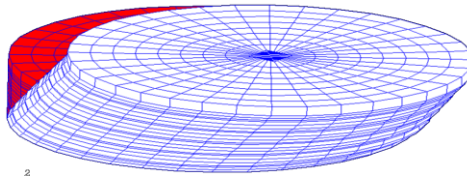
Gerçekleştirilen analitik çalışma içerisinde, Şekil 7, 8, ve 9' da sunulduğu gibi, 7,6 cm kalınlıkta ve 5-katmanlı, 40,6 cm x 40,6 cm ölçülerinde kare, 30 cm x 54 cm ölçülerinde dikdörtgen ve 45,8 cm çapında daire mesnetler, üzerlerine etki eden 115 Ton düşey yük ve merkezlerinden geçen 23 Ton yatay yük altında modellenmişlerdir. Yatay yük, kare ve dikdörtgen mesnetler üzerine, mesnetlerin geometrik merkezlerinden geçen ve çapraz köşelerini birleştiren doğrultuda uygulanmıştır. Daire mesnette ise uygulama doğrultusu, doğrultu merkezden geçtiği sürece yönelimden bağımsızdır.



Şekil 7. Çapraz doğrultuda uygulanan yatay yük altında kare mesnet (2).

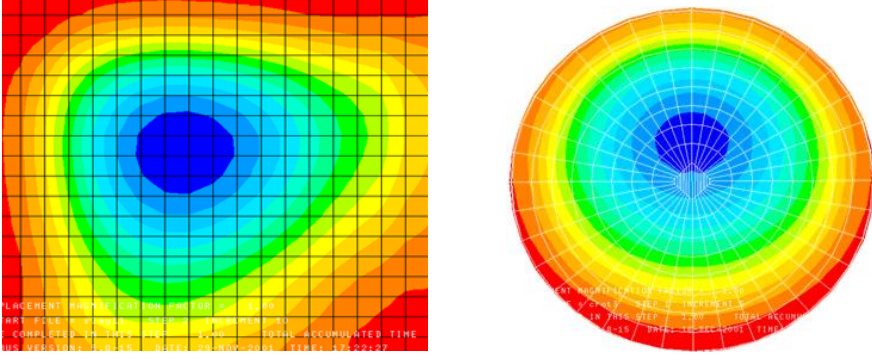


Şekil 8. Çapraz doğrultuda uygulanan yatay yük altında dikdörtgen mesnet (2).



Şekil 9. Yatay yük altında kare mesnet (2).

Tüm mesnetlerde tespit edilen en yüksek yatay sehîm değeri 6,7 cm olmuştur. Şekil 10'da, yatay yönde uygulanan yüklerden dolayı kare ve daire kesitlerde tespit edilen düşey gerilme değeri görülmektedir. Çapraz doğrultuda yatay yük uygulamasından dolayı kare mesnet ara kesiti içerisinde oluşan gerilmelerin dağılımında süreksizlikler ve yükün uygulama doğrultusuna bağılı olarak köşelerde yoğunlaşmalar görülmektedir. Dairesel kesitte ise dağılım daha düzenli, yoğunlaşmalar ise daha azdır.



Şekil 10. Yatay yüke maruz kalan kare ve daire mesnetlerde, düşey basınç gerilmelerinin dağılımı (2).

## Sonuç

Elastomer mesnetlerin yapısal davranışları üzerinde geometrik şekillerinin etkisi bulunmaktadır. Şekil etkeni ile tanımlanan bu davranış, elastomerin sıkıştırılmaz bir malzeme olması ve aynı alana ancak farklı kesit geometrilerine sahip elastomerlerin farklı serbest yüzey alan değerlerine sahip olmaları ile ilgilidir. Bu davranışı ile elastomerin, kesit alan şekli değiştirilerek ve yükler altında şekil değiştirme serbestliği sınırlanarak yükler altında birim direnci (stiffness) değiştirilebilir. Sunulan çalışmada, eşit kesit alanına sahip daire ve kare kesitlere sahip mesnetlerde daire mesnet şeklinin %10 daha yüksek birim direnç sağlayabildiği görülmüştür. Öte yandan, daire mesnetlerin, verimli köprülerin ve/veya eğri giriş içeren köprülerin düşey taşıyıcıları üzerine konumlandırılmaları, daire şeklin davranışının merkezinden geçen tüm doğrultular boyunca tüm doğrultular etrafında aynı olmasından dolayı daha kolaydır.

## Kaynaklar

1. Najm. H, Nassif. H, Bezgin. N.Ö; *Circular Elastomeric Bearings*, FHWA NJDOT 2000-25 Report.
2. Bezgin. N.Ö; *Geometric Effects on the Behavior of Elastomeric Bridge Bearings*, Rutgers, the State University of New Jersey,2002