

## SIVI YAKITLI ROKET MOTORLARINDA KULLANILAN KÖRÜKLÜ MAFSALIN TASARIMI VE ENİYİLEMESİ

Oğulcan Öztürkler<sup>1</sup> ve Erdem Acar<sup>2</sup>  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,  
Ankara

### ÖZET

*Körüklü mafsallar hidrolik hatlarda, inşaatlarda ve nükleer istasyonlar gibi çeşitli alanlarda akıştan ve dış kuvvetlerden kaynaklanan enerjiyi sönmölemek, hatlara esneklik sağlamak ve bu sayede akış hatlarında çatlama, bozulma gibi hasarların önüne geçmek amacıyla sıklıkla kullanılan parçalardır. Eksenel, yanıl ve açısıl hareketlere imkan sağlayan körüklü mafsallar eksenel tipli, gimbal tipli, menteşe tipli vb türde kullanılmaktadır. Sıvı yakıtlı roket motorlarında itki vektör kontrolüne olanak sağlayan körüklü mafsallar bu sayede füzenin yapacağı yönelme hareketleri sırasında hidrolik hatların hasar görmesine engel olurlar. Roket motorlarında hatlara bu esnekliği sağlarken motoru hareket ettiren lineer eyleyicilere karşı ilave kuvvet oluştururlar. Oluşan bu ilave kuvvet daha büyük eyleyicilere ihtiyaç duyulmasına dolayısıyla daha fazla ağırlığa ve hacim zarfına sebep olmaktadır. Literatürde basınç altında çalışın körüklü mafsalların yorulma ve basınca karşı dayanım çalışmaları sıkça çalışılan konulardandır. Hareket sırasında oluşan eğilme momenti ve hareket kaynaklı dayanım çalışmaları ise nadir olarak çalışılan ve incelenmesi zor konulardandır. Bu çalışmada iç basınç altında açısıl harekete izin verecek olan körüklü mafsalların tasarımı, eyleyicilere aktarılacak kuvveti yani körüklü mafsalin eğilme momentini minimize edecek şekilde yapılmıştır. Eniyileme çalışmalarının ardından elde edilen tasarım parametreleriyle hesaplanan analitik sonuçlar sonlu elemanlar yöntemleri ile karşılaştırılacaktır. Sonlu elemanlar yönteminde basınç ve hareket analizleri için ayrı yöntemler ve sınır koşulları kullanılmış modeller ayrı ayrı incelenmiştir. Hareket analizleri için farklı yüklenme koşulları kullanılarak en uygun yöntem seçilmiştir.*

### GİRİŞ

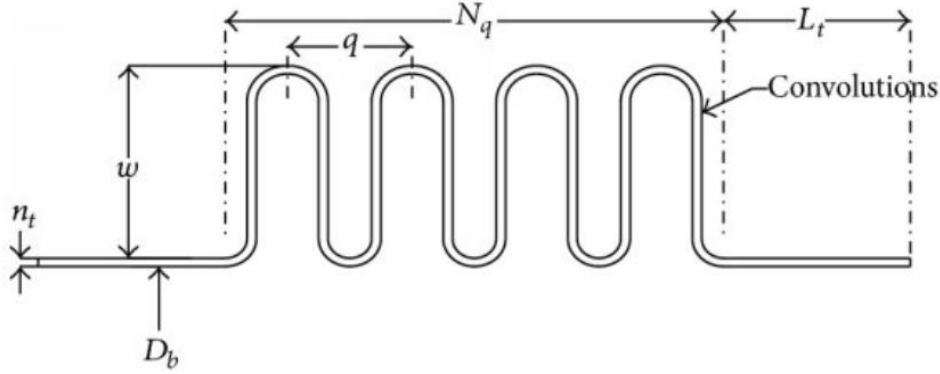
Çeşitli geometrik tasarım parametrelerine sahip olan körüklü mafsallar iç basınç altında çalışırlar. Eksenel, yanıl, açısıl hareket yapma kabiliyetine sahiptirler ve bu yapıların davranışlarını tayin etmek zordur. U tipli, S tipli ve toroidal şekilde farklı kıvrım tipleri ile tasarlanabilirler. Yüksek mukavemete ve aynı anda esnekliğe sahiptirler. Hidroforming, şişirme, sıvama gibi çeşitli yöntemlerle üretilebilen körüklü mafsallar genel olarak paslanmaz çelik veya alüminyum malzemeden üretilirler. Karmaşık bir geometriye sahip olan körüklü mafsallara ait bazı geometrik parametreler Şekil 1.'de görölmektedir. Bunlardan  $D_b$  körük iç çapını,  $w$  kıvrım yüksekliğini,  $n$  katman sayısını,  $L_t$  kıvrımı olmayan kısmın uzunluğunu,  $N$  kıvrım sayısını,  $t$  katman kalınlığını,  $q$  kıvrımlar arasındaki mesafeyi,  $r$  kıvrımların radyus ölçüsünü ifade eder. Körüklü mafsallar çalışırken üzerlerinde toplam 6 adet gerilme oluşur. Bu gerilmelerden 4 tanesi basınç kaynaklı 2 tanesi ise hareket kaynaklıdır. Literatürde basınç kaynaklı oluşan gerilmeler için çeşitli sonlu elemanlar çalışmaları ve optimizasyon yöntemleri bulunmaktadır. Hareket altındaki çalışma durumu için ise yorulma ve ömür çalışmaları yapılmıştır. U şekilli körüklü mafsalların gerilme

<sup>1</sup> Öğrenci, Makine Müh. Böl., E-posta: o.ozturkler@etu.edu.tr

<sup>2</sup> Prof. Dr., Makine Müh. Böl., E-posta: acar@etu.edu.tr

karakteristiği için numerik çalışmalar yapılmıştır [S. H. Gawande, N. D. Pagar 2015]. Körüklerin yorulması üzerine çalışmalar yapılmış olup ve  $\Omega$  şekilli körüklerin gerilmeleri için efektif eliptik açı gösterilmiştir [Becht IV, C., 2000]. Körükler için sonlu elemanlar analizleri yapmış olup farklı yükler altında tek katmanlı ve çok katmanlı körüklerin davranışlarını incelenmiştir. Kuvvet-yer değiştirme, plastik gerinim dağılımı ve moment- açısal yer değiştirme grafikleri çıkartılmıştır [Xiang, X. M., Lu, G., Li, Z. X., and Lv, Y., 2017].

Bu çalışmada literatürdeki çalışmalara ek olarak hareketi sağlamaya yönelik moment kavramı üzerine daha detaylı çalışmalar yapılmış olup analitik olarak hesaplanan değerler analiz çalışmaları ile doğrulanmaya çalışılmıştır. Analiz çalışmaları tamamlandıktan sonra eniyileme çalışmaları yapılarak uygun tasarım parametreleri elde edilmiştir.



Şekil 1: Körüklü Mafsal Kesit Görüntüsü ve Geometrik Parametreler Modelleri [S. H. Gawande, N. D. Pagar 2015]

## YÖNTEM

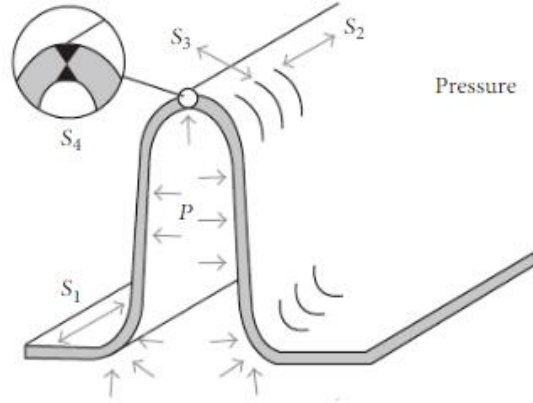
### İç Basınç Dayanım Hesaplamaları ve Sonlu Elemanlar Yöntemi

Gerilmeler hesaplanırken EJMA tarafından standardize edilmiş formüller kullanılır. Şekil 2.'de körüklü mafsalın üzerinde basınç kuvvetinin oluşturduğu gerilmelerin yönleri verilmiş ve bu gerilmelerden bazılarının formülleri Denklem 1. Ve 2.'de verilmiştir. Denklem 1. Kıvrım alt çapında oluşan membran gerilmesini Denklem 4. İse kıvrım üst noktasında kalınlık boyunca oluşan eğilme gerilmesini ifade eder. Bu eğilme gerilmesi katmanın alt ve üst noktalarında maksimum, katmanın orta kısmında ise minimum olacak şekilde dağılım gösterir. Geometrik parametrelerle beraber Cp, Cf ve Cd boyutsuz tasarım faktörleri de formüllere girdi olarak verilir. Bu faktörler EJMA tarafından verilen grafiklerden elde edilir.

$$S_1 = \frac{P(D_b + nt)^2 L_t E_b k}{2(nt E_b L_t (D_b + nt))} \quad (1)$$

$$S_4 = \frac{P w^2 C_p}{2 n t^2} \quad (2)$$

Sonlu elemanlar yöntemiyle analizler yapılırken, basınç kaynaklı gerilme analizlerinde körüklü mafsalın her iki ucu da sabit mesnet olarak modellenmiş olup basınç körüklü mafsalın iç yüzeylerine verilmiştir. S1 ve S2 gerilmesinin Hoop Gerilmesi'ne benzediği görüldüğü için bu gerilmeyi inceleyebilmek adına silindirik koordinat takımı eklenmiş olup bu yöndeki normal gerilmelere bakılmıştır. Ardından analitik olarak hesaplanan sonuçlarla sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

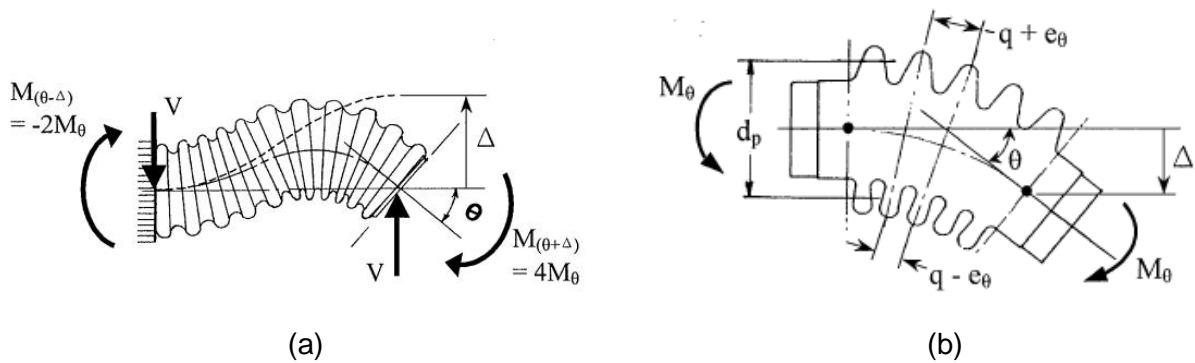


Şekil 2: Körüklü Mafsallarda Basınç Kaynaklı Oluşan Gerilme Yönleri Modelleri [S. H. Gawande, N. D. Pagar 2015]

### Hareket Dayanım, Moment Hesaplamaları ve Sonlu Elemanlar Yöntemi

Körüklü mafsallar aksenal, yanal ve açısal hareket yapma kabiliyetlerine sahiptirler. Şekil 3'te görüldüğü gibi Körüklü mafsallar için 2 farklı açısal hareket türü mevcuttur. Bunlardan biri saf eğilme (Şekil 3.a) olup mafsalların sağ ve sol uçlarındaki çemberlerin merkezleri hareket sonrası aynı ekseninde kalır. Diğer hareket türü ise uç kısmın açısal hareketi sırasında eğilme yönünde yer değiştirmesiyle gerçekleşir (Şekil 3.b). Bu hareket tipinde yanal hareketten gelen eğilme momentinin de değerlendirilmesi gerekir. Yanal hareket miktarı dönme noktası çemberin merkezi, sabitlenen nokta çember üzerinde herhangi bir nokta ve dönme hareketi sonrası oluşan yay ise çemberin bir bölümü olarak kabul edilir. Trigonometrik hesaplamalar yapılarak yer değiştirme miktarı hesaplanabilir.

Sıvı yakıtlı roket motorlarında hareketi sağlayan gimbal parçasının dönme eksenlerine mümkün olduğunca yakın konumlandırılan körüklü mafsallar da doğrudan açısal harekete maruz kalırlar. Bu hareket eğilme momenti oluşturur ve itki vektörüne hareketi yaptıran eyleyicilere karşı kuvvet oluştururlar. Hareket incelemesi yapılırken basınç analizlerinden farklı olarak körüğün bir tarafı sabitlenmiş olup diğer ucuna ise hareket tanımlaması yapılmıştır. Yapılan hareket tanımlamalarından biri belirli bir dönme açısı altında efektif uzunluğun en uç noktasının (hareketli taraf) düşey eksenindeki yer değiştirme miktarının analizlere girdi olarak verilmesidir. Bir diğer yöntem ise körüğün serbest ucuna doğrudan açı değeri verilmesidir.



Şekil 3: Körüklü Mafsallarda Açısal Hareket Tipleri [Liang-Chuan Peng, Tsen-Loong Peng 2009]

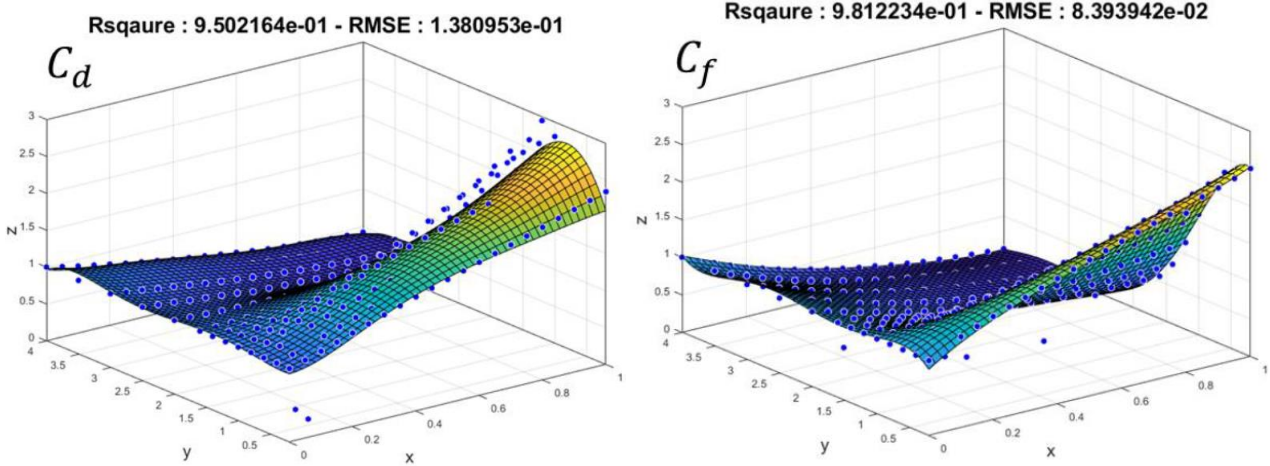
Analitik hesaplamalar yapılırken kullanılan bazı formüller Denklem 3. Ve 4.'te verilmiştir. Körüklü mafsallı döndürmek için gereken eğilme momenti Denklem 3'te verilmiştir. Eğilme momenti, yay oranına, ortalama körük çapına ve eşdeğer aksenal yer değiştirme miktarına bağlıdır. Yay oranı ise malzeme elastik modülüne, boyutsuz tasarım faktörlerine ve geometrik parametrelere bağlıdır. Denklem 4.'te hareket kaynaklı eğilme gerilmesi formülü verilmiştir.

$$M_{\theta} = \frac{f_w D_m}{4} (e_{\theta} + e_y) \quad (3)$$

$$S_6 = \frac{5E_b t e}{3w^2 C_d} \quad (4)$$

### Körüklü Mafsall Optimizasyon Yöntemi

Problem tanımı malzeme basınç altında harekete maruz kalırken bu hareketi sağlayan eğilme momentini malzeme kopmayacak şekilde minimize etmektir. Bu çalışmada belirli sınırlamalar altında iç noktalar algoritması kullanılarak lineer olmayan kısıtlı optimizasyon çalışması yapılarak optimum değerler bulunmaya çalışılmıştır. Bu çalışma yapılırken türevlenemeyen değişkenler türevlenebilir hale getirilmiştir.  $C_p$ ,  $C_d$  ve  $C_f$  faktörleri 5. Dereceden polinomlar ile yüzey yanıt modeli kullanılarak sürekli ve türevlenebilir fonksiyonlar haline getirilmiştir.  $C_d$  ve  $C_f$  katsayılarına ait yüzey yanıtları Şekil 4.'te verilmiştir. Körüklü mafsallar plastik bölgede de çalışabildiği için sınırlamalar malzemenin akma dayanım değerinin üzerinde ancak malzemenin kopmayacağı bir değerde verilmiştir. En iyilenen tasarım parametreleri, kıvrım sayısı (N), kıvrım merkezleri arası uzaklık (q), kıvrım yüksekliği (w), katman kalınlığı (t) ve katman sayısı (n)'dir. Şekil 5.'te optimizasyon matematik modeli verilmiştir.



Şekil 4: Tasarım Faktörleri Yüzey Yanıt Modeli

**s. t (Equality):**

$$f_w = 0.67f_i$$

$$f_i = \frac{1.7D_m E_b t^3 n}{w^3 C_f}$$

$$D_m = D_b + w + nt$$

$$e_\theta = \frac{\theta D_m}{N}$$

$$e_y = \frac{3D_m \gamma}{N(Nq - x)}$$

$$K_r = \frac{2(q + e_x) + \frac{e_\theta}{K_\theta} + e_y}{2q}$$

$$K_\theta = \frac{e_\theta}{e_\theta + 0.15q\varphi}$$

$$k = \min\left(\frac{L_t}{1.5\sqrt{D_b t}}, 1\right)$$

$$\varphi = \frac{PN^2 q}{0.764\pi f_i} \quad A_c = \left[2\pi \frac{q}{4} + 2\sqrt{\left[w - \frac{q}{2}\right]^2}\right] tn$$

$$\text{argmin}_{N,q,w,t} M_\theta = \frac{f_w D_m}{4}(e_\theta + e_y)$$

**s. t (Inequality):**

$$S_1 = \frac{P(D_b + nt)^2 L_t E_b k}{2(nt E_b L_t (D_b + nt))} \leq 485 \text{ MPa}$$

$$S_2 = \frac{P D_m K_r q}{2 A_c} \leq 485 \text{ MPa}$$

$$S_3 = \frac{P w}{2 n t} \leq 485 \text{ MPa}$$

$$S_4 = \frac{P w^2 C_p}{2 n t^2} \leq 485 \text{ MPa}$$

$$S_5 = \frac{E_b t^2 e}{2 w^3 C_f} \leq 485 \text{ MPa}$$

$$S_6 = \frac{5 E_b t e}{3 w^2 C_d} \leq 485 \text{ MPa}$$

Şekil 5. Optimizasyon Matematik Modeli

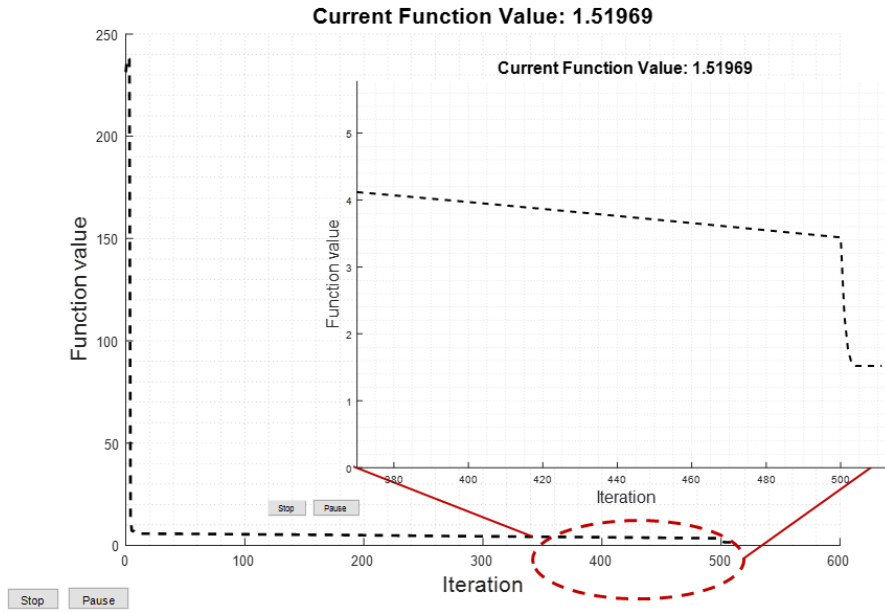
## UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

İlk aşama olarak literatürde bulunan çalışmalar arasından seçilen körüklü mafsallı parametreleri ile analitik hesaplamalar yapılmış ardından mevcut tasarım parametreleri ile sonlu elemanlar analizleri yapılarak literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Analitik hesaplamalarda tutarlılık görülürken analiz sonuçlarında literatürdeki çalışmalardan farklı sonuçlar elde edilmiştir. Gerilme değerleri incelenirken daha iyi sonuç almak adına farklı yöntemler denenmiş, silindirik koordinat takımı eklenmiştir. Analizlere nihai durumda literatürdeki çalışmalardaki sınır koşulları ve yüklemeler yapılarak devam edilmiştir. Geometrik parametrelerin değişimi ile beraber analitik sonuçlarla sonlu eleman analizlerinde elde edilen gerilme değerlerinin tutarlılığının da değiştiği gözlemlenmiştir. Daha sonra eğilme momentini elde edebilmek için analiz modelleri kurulmuş olup farklı geometrilere farklı sınır koşulları ve yüklemeler yapılarak analitik sonuçlarla kıyaslanmıştır. Açısal hareketin oluşturduğu eğilme momenti ile beraber bu hareket sırasında yanal hareketin de oluşturduğu momentin analitik hesaba katılması gerektiği görülmüştür. Bu analiz modeli ile oluşan gerilme değerleri analitik sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Analiz yöntemleri oluşturulduktan sonra eniyileme çalışmalarına geçilmiştir. Malzemenin kopmasına sebep olmayacak şekilde verilen dayanım kısıtlamaları altında eğilme momenti minimize edilmiştir. Burada eniyilenen tasarım parametreleri  $N, q, w, t$  ve  $n$ 'dir. Tablo 1'de başlangıç tasarım parametreleri ile oluşan eğilme momenti ve gerilme değerleriyle birlikte eniyilenmiş sonuçların karşılaştırılması görülmektedir. Optimizasyon sırasında parametrelerin alt ve üst sınırları literatürden elde edilen bilgiler ve üretimsel faktörler değerlendirilerek verilmiştir. Şekil 6.'da iterasyonlara karşı amaç fonksiyonunun değişimi verilmiştir.

Tablo 1: Başlangıç ve Eniyelenmiş Tasarımların Karşılaştırılması

	Başlangıç Tasarımı	Eniyelenmiş Tasarım
$X$	$[20, 18 \times 10^{-3}, 10 \times 10^{-3}, 0.3 \times 10^{-3}, 4]^T$	$[19, 8.3 \times 10^{-3}, 19.3 \times 10^{-3}, 0.3 \times 10^{-3}, 4]^T$
$f$	381.5 Nm	1.519 Nm
$S_1$	9.26 MPa	24.56 MPa
$S_2$	7.10 MPa	11.02 MPa
$S_3$	2.23 MPa	12.09 MPa
$S_4$	11.8 MPa	485.0 MPa
$S_5$	71.7 MPa	1.23 MPa
$S_6$	<b>1213.3 MPa</b>	230.5 MPa



Şekil 6: İterasyonlara Karşılık Amaç Fonksiyonu Değerleri

## SONUÇ

Bu çalışmanın amacı sıvı yakıtlı roket motoru çalışması esnasında füzenin yönelimini sağlamaya yardımcı olacak olan körüklü mafsallı elamanının eğilme momentini minimize etmektir. En iyileme çalışmaları yapılmadan önce parçanın gerilme ve moment değerleri analitik olarak hesaplanmış olup sonlu elemanlar yöntemleriyle doğrulanmaya çalışılmıştır. Analiz modelleri belirli bir olgunluk seviyesine geldikten sonra eniyileme çalışmaları yapılmıştır. Matematiksel model oluşturulup iç noktalar algoritması ile non-lineer kısıtlı eniyileme çalışması yapılmıştır. Boyutsuz tasarım faktörleri

için 5. Dereceden polinomlar ile yüzey yanıt modeli kullanılmıştır. Çalışmanın devamında amaç doğrultusunda beklenen proje çıktıları şu şekilde olacaktır:

- i) İç basınç altındaki analiz yöntemleri iyileştirilmeye çalışılacak ve tasarım parametrelerinin hesaplanan analitik değerler ile numerik sonuçlardan elde edilen değerlerin tutarlılığına olan etkisi incelenecek
- ii) Hareket kaynaklı oluşan eğilme gerilmesi için analiz yöntemleri geliştirilmeye çalışılacak
- iii) Analiz yöntemlerinin validasyonu tamamlandıktan sonra optimizasyon kodundan elde edilen tasarım parametreleri ile analitik sonuçlar ve numerik sonuçlar karşılaştırılacaktır.

### **Kaynaklar**

- Becht IV, C., 2000, “Fatigue of Bellows, a New Design Approach,” Int. J. Press. Vessel. Pip., 77(13), pp. 843–850.
- EJMA (2008) Standards of Expansion Joint Manufacturers Association, Inc., New York, 9th edn, section 4, pp 64–107
- Gawande, S. H., Pagar, N. D., Wagh, V. B., and Keste, A. A., 2015, “Numerical Investigations on Characteristics of Stresses in U-Shaped Metal Expansion Bellows,” Int. J. Met., 2015, pp. 1–9.
- Liang-Chuan Peng, Tsen-Loong Peng -Pipe Stress Engineering (2009, ASME Press (American Society of Mechanical Engineers)
- Xiang, X. M., Lu, G., Li, Z. X., and Lv, Y., 2017, “Finite Element Analysis and Experimental Study on a Bellows Joint,” Eng. Struct., 151, pp. 584–598.