

UZAY ARAÇLARINDA MERKEZİ SİLİNDİR GEOMETRİK OPTİMİZASYONU

Mehmet Şahin¹
TUSAŞ, Ankara

Ahmet Atak²
Gazi Üniversitesi, Ankara

ÖZET

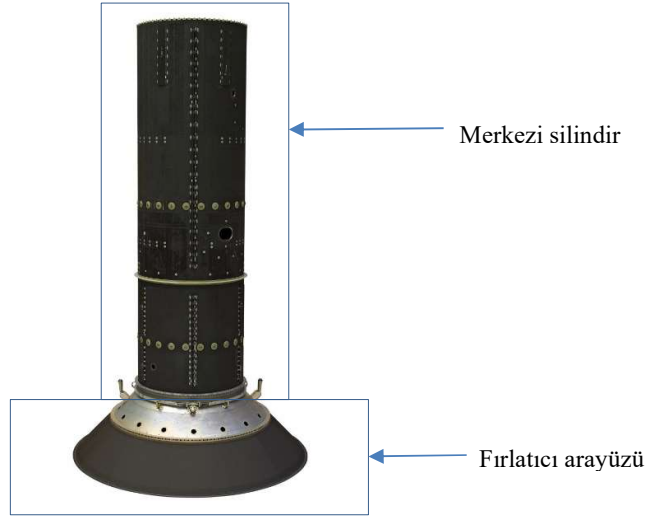
Merkezi silindir (MS) ler, özellikle haberleşme uydularında kullanılan tüm uyduyu taşıyan ana taşıyıcı yapısal elemanlardır. Daha fazla elektriksel güç, daha fazla faydalı yük ve daha uzun hizmet ömrü açısından daha yüksek kapasiteye uydular için uyduda daha fazla hacim oluşturmak ve etkili alan kullanımını gerektirir. Haberleşme uydularında geleneksel kimyasal itki sistemlerinde MS'in iç bölgesi yakıt tanklarını yerleştirmek için kullanılmaktadır. Teknolojik ilerlemeler sonucu elektriksel itki sistemleri kullanma eğilimi, daha küçük yakıt tankı gerektirmektedir. Dolayısıyla daha küçük hacimli merkezi silindir MS kullanılması durumunda faydalı yük kullanımı için daha fazla alan ve hacim sağlanarak uydu kapasitesi artırılabilir. Bu çalışma, faydalı yük kullanımı için daha fazla alan ve hacim elde etmek için MS optimizasyonudur. Bu çalışmada tek veya üst üste konularak çoklu fırlatmaya uygun her iki uç kısımları eşit konik ve orta kısmı sabit çaplı düz silindirlerden oluşan MS in en az hacim için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Orta sabit çaplı silindirden uç kısımlara geçişi sağlayan konik silindirlerin optimal açıları analitik olarak elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen bu optimal geçiş acılı MS'lerin uzay aracı ve fırlatıcı isterlerine göre de değerlendirilerek tüm geometrik ve yapısal isterleri sağlayan en optimal MS elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışma uydu ana taşıyıcısı olan MS tasarımında faydalı olacaktır. Daha detaylı çalışma için gerçek modellerin üretilip test edilerek teorik sonuçların gerçek modellerle doğrulanması önerilmektedir. Fakat bu tür yapısal elemanların üretimi ve testleri pahalı olduğundan küçük boyutlarda üretilip test edilerek çalışmanın doğrulanması mümkün olabileceği öngörülmektedir.

GİRİŞ

MS ler uydularda yüksek katılık, minimal kütle gibi ideal ana taşıyıcı yapısal eleman olmasının yanında içerisine yakıt tanklarının yerleştirilmesini mümkün kıldığı için ideal yapısal elemanlardır. Dışsal hacim olarak en büyük yapısal eleman olup genellikle uzunluğu uydu ana gövdesi uzunluğundadır. MS aynı zamanda uyduyu fırlatıcıya bağlayan ara-yüz elemanı olması nedeniyle fırlatıcıya bağlanan tarafı fırlatıcı ara-yüz adaptörü ile aynı yarıçaplıdır. Bu nedenle genellikle MS'ler fırlatıcı ara-yüz adaptörü çapıyla aynı olacak düz veya fırlatıcıya bağlantı tarafı konik, üst kısmı düz silindir olacak şekilde yapılırlar(Şekil 1). Tablo-1 de fırlatıcıların kullandıkları arayüz adaptör çaplarını göstermektedir[Falcon X 2020, Proton, 2020, Araine 5, 2020]. Haberleşme uydularında en yaygın olarak 937 mm ve 1194 mm çaplı adaptörler kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışma daha 937 mm ve 1194 mm lik adaptörler sonlu elemanlar modellerinde ve analitik uygulamalarda kullanılacaktır.

¹ Dr., Makine Mühendisi, e-posta: mehmet.sahin2@tai.com.tr

² Dr. . Öğr. Gör., e-posta: ahmet.atak@gazi.edu.tr



Şekil 1: Merkezi silindir ve fırlatıcı adaptörü

Tablo 1: Farklı fırlatıcı arayüz adaptör çapları

Küçük çaplı adaptörler Çap (mm/inç)	Büyük çaplı adaptörler Çap (mm/inç)
356/14	937/37
432/17	1194/47
610/24	1666/66
818/32	2624/104

Kimyasal itki ye sahip uydularda yakıt tankları merkezi silindirin içine yerleştirilir. Elektriksel itki sistemleri özellikle haberleşme uydularında uzun yıllardan beri genellikle yardımcı itki sistemi şeklinde kullanılmaktaydı. Elektrikli iticilerdeki teknolojik gelişmeler ve çeşitlenmelerle beraber bu sistemler için gerekli güneş panel hücrelerindeki verimlilik artışı tamamıyla elektrikli itki sistemlerinin haberleşme uydularında kullanımını standart hale getirmek üzeredir. Bu daha güçlü haberleşme uydularının yapılmasının yan ısıra yakıt tanklarının önemli ölçüde küçülme sini ve yakıt miktarının azalmasını da sağlamıştır. Küçülen yakıt tankları merkezi silindir içinde daha az yer kaplamasını sağlayarak daha az hacimli MS yapılmasına olanak sağlar.

Etkin alan ve hacim kullanımı uzay araçlarında büyük önem arz etmektedir. Fırlatıcı fırlatma maliyetleri nedeniyle daha hafif fakat daha güçlü haberleşme uyduları yapılarak uydunun frekans bant genişliği birim fiyatının düşürülmesi yönünde uydü üreticilerinin rekabeti bulunmaktadır. Bunun için tam elektrikli itki sistemlerin kullanımı, daha az güç ve ısı salınımı amacıyla entegre edilmiş elektronik sistemler ve eklemeli imalat yöntemleri ile mekanik parçaların üretimi gibi teknolojik yenilikler kullanılarak maliyet düşürme ve kapasite artırımı sağlanmaya çalışılmaktadır. Bu sistemlerin iyi tasarlanmış olmasını ve etkin bir şekilde yerleştirilmesini, en az hacim ve kütle ile en fazla verim elde edilmesini zorunlu kılmaktadır. Diğer bir faktörde, son yıllarda fırlatma maliyetlerin düşürmek için, tek bir fırlatma sırasında birden fazla uydü ve uzay araçlarının fırlatılması konusunda fırlatıcılar çok daha fazla seçenekler sunmaya başlamış bulunmalarıdır. Bu tür çoklu fırlatma yöntemi fırlatma maliyetlerini çok fazla düşürdüğü için bu fırlatıcıların sunmuş oldukları hacim ve kütle kriterlerine uygun uyduların üretimi yaygınlaşmaktadır. Bu amaçla küçülen fırlatıcı yer ebatlarına uygun uydularda etkin hacim kullanımı büyük önem arz etmektedir. Çoklu fırlatma, yan yana olduğu gibi tek kapsülde üst üste uyduların konulması veya çift kapsül kullanarak her bir kapsüle bir veya birden fazla uzay aracının konularak fırlatılmasını mümkün kılmaktadır [1, 2, 3]. Bu tür uydularda da etkin hacim kullanımı amaçlanarak uydunun kapasite-birim maliyeti düşürülmektedir. Merkezi silindir tek parça, uzun, içi boş, tek başına en fazla kütleli olup ve ana yük taşıyıcı yapısal elemandır. Etkin optimizasyon yöntemleri ile kütlesi düşürülerek önemli oranda kütle kazanımı sağlanması mümkündür. Malzeme olarak kompozit sandviç cidarlı MS, en yaygın

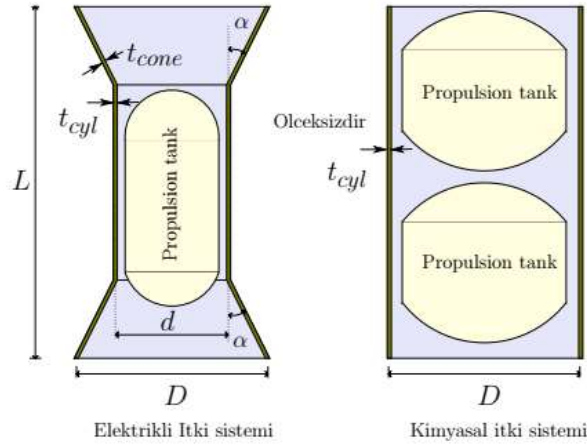
kullanılan tipidir. Alüminyum kaplamalı sandviç cidarlı MS lerde kullanılmaktadır. Son yıllarda, çok daha hafif ızgara yapılı MS ler üretilerek uydularda kullanılmaktadır. Elektrik itki sistemleri kimyasal itki sistemlerine göre daha küçük yakıt tanklarına ihtiyaç duymakta ve küçük yakıt tankları, MS lerinde küçülme sini mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmada tek veya üst üste konularak çoklu fırlatmaya uygun her iki uç kısımları eşit konik ve orta kısmı sabit çaplı düz silindirlerden oluşan MS in en az hacim dolayısıyla en az kütle için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Orta sabit çaplı silindirden uç kısımlara geçişi saylayan konik silindirlerin optimal açıları analitik olarak elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen bu optimal geçiş açılı MS'lerin uzay aracı ve fırlatıcı isteklerine göre de değerlendirilerek tüm geometrik ve yapısal istekleri sağlayan en optimal MS elde edilmeye çalışılmıştır. Bulunan optimum yapılar tipik büyüklükteki haberleşme uyduları referans alınarak ön tasarım istekleri ve potansiyel fırlatıcı istekleri belirlenmiştir. Bu istekleri karşılayacak şekilde sonlu elemanlar modeli oluşturularak analizleri yapıp teorik optimum sonuçları ile mukayese edilmiştir. Bu çalışma uydu ana taşıyıcısı olan MS tasarımında faydalı olacaktır. Daha detaylı çalışma için gerçek modellerin üretilip test edilerek teorik sonuçların gerçek modellerle doğrulanması önerilmektedir. Fakat bu tür yapısal elemanların üretimi ve testleri pahalı olduğundan küçük boyutlarda üretilip test edilerek çalışmanın doğrulanması mümkün olabileceği öngörülmektedir.

METOT

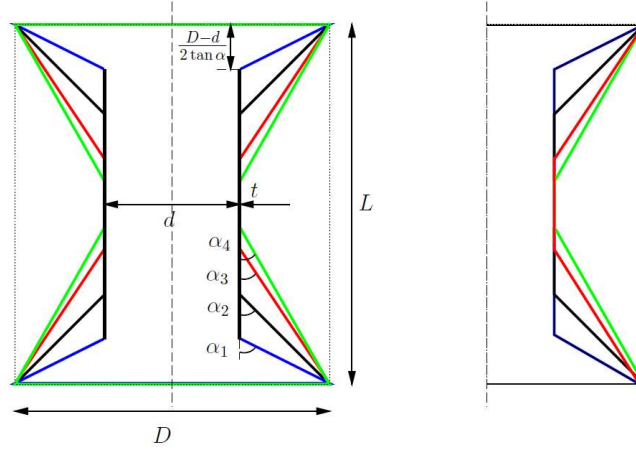
Motivasyon

Şekil 2 de optimize edilecek konik başlıklı MS ve düz yapılı MS ler görülmektedir. Konik olan tipik elektrikli itki sistemine sahip, düz olan ise tipik kimyasal itki sistemine sahip uyduların MS kesitlerini göstermektedir. Konik açıları optimizasyon parametresidir. Bu yapıda iç düz silindri çapı ile koni silindirlerin geniş uçları sabit çaplara sahip oldukları var sayılmışlardır. Düz silindir çapı içerisindeki yakıt tankı çapına göre belirleneceği varsayılmıştır. Koni geniş taraf çapları da fırlatıcı adaptörüne bağlanacağı için fırlatıcı adaptör çapında olacaktır. Teorik olarak silindirden koniye optimal bir geçiş daha yumuşak olabilir. Bu yumuşak geçiş için daha ileri seviye bir optimizasyon yöntemi uygulanabilir. Fakat böyle optimal yumuşak bir geçiş bölgesi elde edilse bile bu geçiş bölgesinin üretimi zor olacağından pratik olmayacağı varsayılarak göz önünde bulundurulmamıştır.



Şekil 2: Konik başlıklı ve düz MS ler

Şekil 3 de uç ve iç çap aynı kalacak şekilde silindirden konuya farklı açılarla geçiş olabileceği gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi α açısı çok dar olursa düz silindir uzunluğu kısa olacak fakat konik silindirler uzun olacaktır. Benzer şekilde gibi α açısı geniş olursa düz silindir uzunluğu uzun koni uzunlukları daha kısa olacaktır. Optimal bir geçiş için matematiksel bağıntıların elde edilerek optimizasyonun yapılması gerekmektedir.



Şekil 3: Farklı açılara sahip silindir koni geçişleri

Optimizasyon çalışması

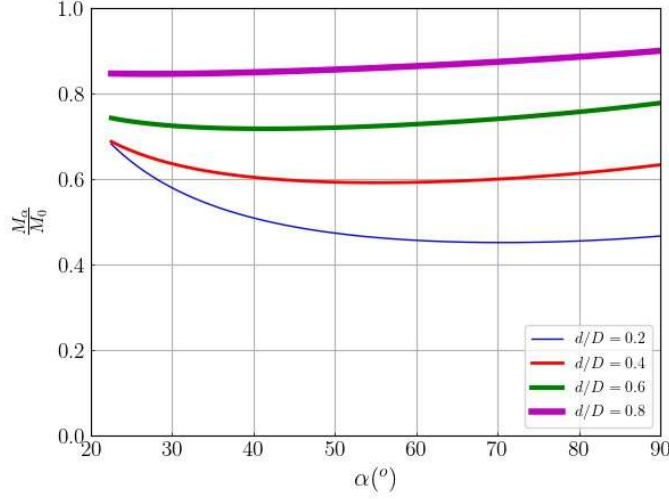
MS in sabit kalınlığa sahip sandviç cidara veya katı alüminyum dan olduğu varsayılabilir. İki ucu konik ve ortası düz silindirlerin toplam malzeme hacmi

$$\begin{aligned}
 V &= V_{cones} + V_{cyl} \\
 &= \pi D t_{cone} L \left[\frac{1}{2} \frac{D}{L} \frac{1}{\sin \alpha} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right) \right] \\
 &+ \pi D t_{cyl} L \left[\frac{d}{D} \left(1 - \frac{D}{L} \frac{1}{\tan \alpha} \left(1 - \frac{d}{D} \right) \right) \right]
 \end{aligned} \quad (1)$$

Referans olarak optimize edilmemiş düz silindirin malzeme hacmi $V_0 = \pi D t L$ dir. Normalize edilmiş kullanılan toplam malzeme miktarı şu şekilde hesaplanır.

$$\frac{V}{\pi D t L} = \frac{V}{V_0} = \frac{M}{M_0} = \frac{1}{2} \frac{D}{L} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] \frac{1}{\sin \alpha} + \frac{d}{D} \left[1 - \frac{D}{L} \left(1 - \frac{d}{D} \right) \frac{1}{\tan \alpha} \right] \quad (2)$$

Burada D/L ve d/D oranları sırasıyla çap/yükseklik ve iç-çap/dış-çap oranlarıdır ve silindirin geometrik özelliklerini yansıtmaktadır. Şekil 4 de Farklı (d/D) oranları için açıya bağlı olarak değişen normalize edilmiş (M/M_0) oranları grafiği gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi farklı (d/D) oranları için değişen optimal açı değerleri vardır. Düşük (d/D) oranında optimal (M/M_0) oranının açı ile değişiminin daha etkin olduğu görülmektedir. Genel olarak nispeten küçük (d/D) oranları için optimal açılar 55-70 derece arası büyük (d/D) oranları için 40-50 derecedir.



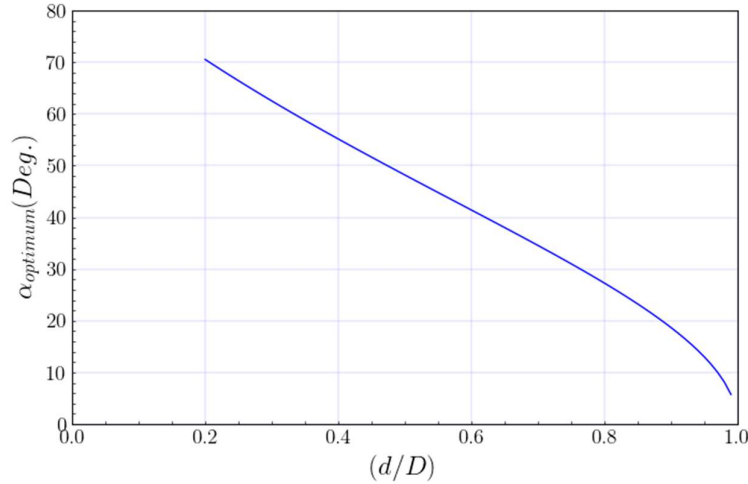
Şekil 4: Farklı (d/D) oranları için açıya bağlı olarak değişen normalize edilmiş (M/M_0) oranları

Yukarıda belirtildiği gibi en uygun koni açısı en düşük malzeme hacmini verecektir. Optimizasyon, gradyant metot kullanılarak elde edilebilir. Bunun için normalize edilmiş hacmin ($\frac{V}{V_0}$) açıya göre kısmi türevi şöyledir.

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{V}{V_0} \right) = -\frac{1}{2} \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} \right) \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right) + \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{d}{D} \right) \left(\frac{1}{\sin^2 \alpha} \right) \left(1 - \frac{d}{D} \right) = 0 \quad (3)$$

Bu eşitliği sağlayan açı optimum açıdır.

$$\cos \alpha = 2 \frac{\frac{d}{D}}{\left(1 + \frac{d}{D} \right)}, \quad \text{veya} \quad \alpha = \arccos \left(2 \frac{\frac{d}{D}}{1 + \frac{d}{D}} \right) \quad (4)$$



Şekil 5: Optimal açının (d/D) oranı ile değişimi

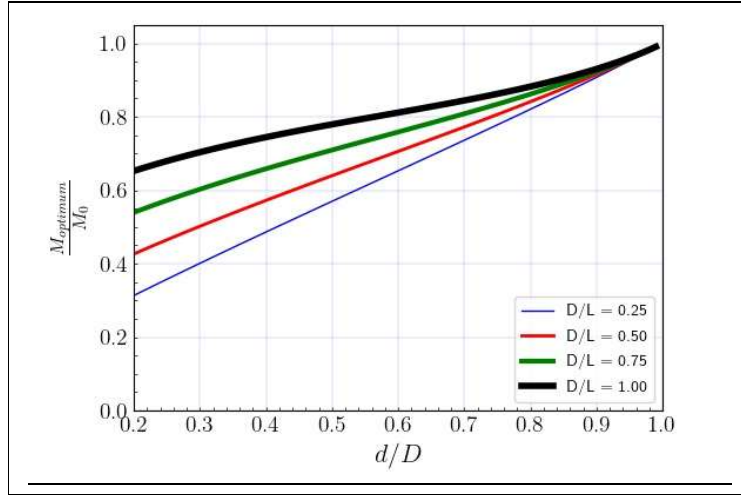
Optimal açı (d/D) orantısının bir fonksiyonudur. MS lerde orta silindirin çapını (d) yakıt tankının çapı belirlemekte olup, dış çap (D) da seçilen fırlatıcı arayüz çapıdır. Dolayısıyla yakıt tankı çapı en belirleyici parametredir. Bu ilişki hemen hemen doğrusal olup $\alpha \cong -71 \left(\frac{d}{D} \right) + 84$ bağıntısı ile ifade

edilebilir. Bu bağıntıda α açısı derece cinsindedir. Verilen optimal açı ile elde edilen yapının normalize edilmiş kütle (hacim) oranları şöyle olur.

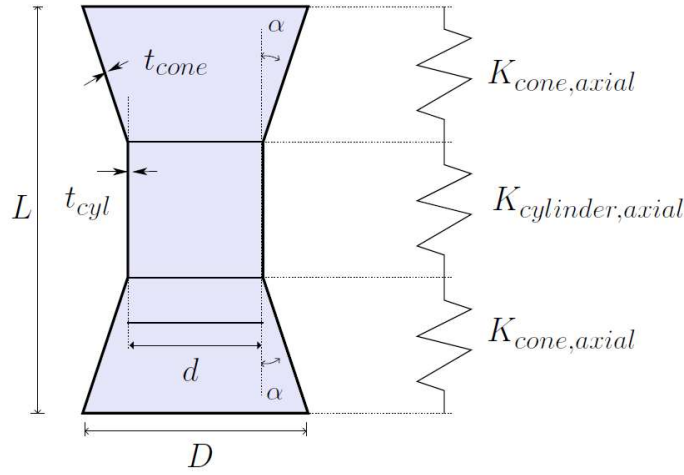
$$\frac{M_{opt}}{M_0} = \frac{V_{opt}}{V_0} = \frac{d}{D} + \frac{1}{2} \frac{D}{L} \left(1 - \frac{d}{D}\right) \sqrt{1 + 2 \frac{d}{D} - 3 \left(\frac{d}{D}\right)^2} \quad (5)$$

Şekil 6 da farklı silindir dış-çap/yükseklik ve iç-çap/dış-çap oranlarına bağlı olarak optimal kütle oranı eğilim grafiği gösterilmiştir. Bu grafikten anlaşıldığı gibi, optimal kütle oranı (M_{opt}/M_0) iç-çap/dış-çap oranı ile artmaktadır fakat bu eğilim düşük (D/L) oranlarında daha belirgin olup yüksek (D/L) oranlarında daha az etkilenmektedir.

Yukarıdaki elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, her türlü (d/D) ve (D/L) oranı için kütle azaltacak bir uygun açı vardır. Bu teorik sonuçlar daha çok geometrik optimizasyonu sağlar fakat uydunun diğer mekanik isteklerini de karşılaması gerekmektedir. Uydunun yatay ve dikey ana frekans istekleri, fırlatıcı ara yüzünde ve üst-üste konfigürasyon için alt ve üst arayüz kısımlarına gelecek yük akışı seviyeleri ve diğer istekleri içinde değerlendirilmesi gerekir.



Şekil 6: Farklı silindir dış-çap/yükseklik ve iç-çap/dış-çap oranlarına bağlı olarak optimal kütle oranı



Şekil 7: MS basit dinamik modellenmesi

MS dinamik karakteristikleri

MS in ön tasarımında en uygun açılı tespit edildikten sonra bu şekildeki MS in diğer isterlerle karşılaştırılması gerektirmektedir. Bunun için ilk önce basit analitik modellerle başlayarak daha sonra sonlu elemanlar modelleri ile doğrulamak gerekmektedir. MS iki konik bir düz silindirden oluşan üç parçalı yapısal eleman olarak idealize edilebilir. Her bir parçanın dikey katılığı göz önünde bulundurulduğunda her bir parça yay gibi davrandığı kabul edildiğinde bu üçlü yapının eksen el yöndeki denk yapısal katılığı üç yayın seri bağlanmış hali olur. (Şekil-7). Denk katılık şu şekilde ifade edilebilir.

$$\frac{1}{k_e} = \frac{1}{k_{koni}} + \frac{1}{k_{koni}} + \frac{1}{k_{silindir}} \quad (6)$$

Konik silindirlerin dik yöndeki katılık değeri şöyledir[Young, 1989].

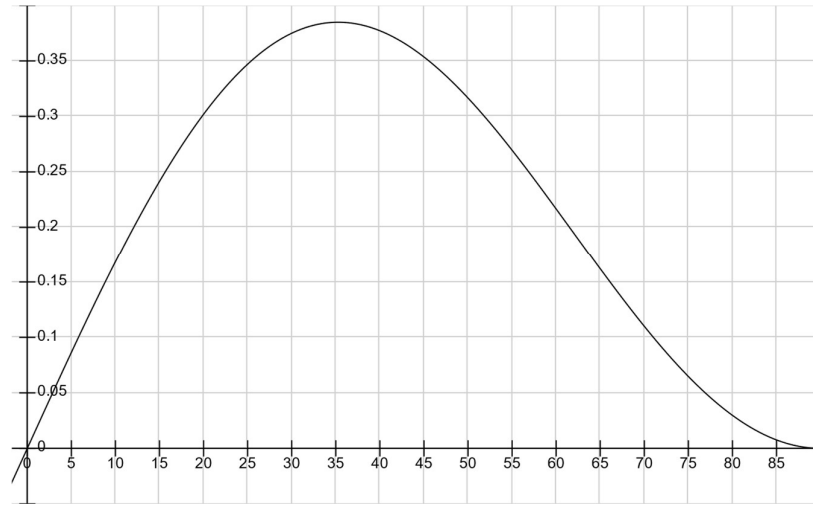
$$k_{koni} = 2\pi Et \frac{\sin \alpha \cos^2 \alpha}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (7)$$

Düz silindirin eksen el yöndeki katılık değeri ise

$$k_{silindir} = \frac{\pi d E t}{L_{silindir}} = \left(\frac{d}{D}\right) \frac{\pi E t}{\left[\frac{1}{\left(\frac{D}{L}\right)} - \frac{(1-d/D)}{\tan \alpha}\right]}$$

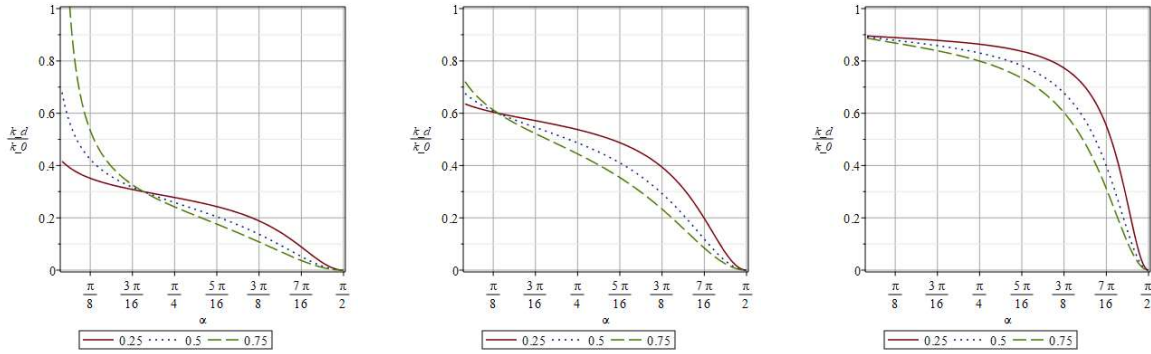
Bu sistemin denk katılık değeri yaklaşık olarak şu şekilde yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$k_e = \frac{k_{koni} k_{silindir}}{2k_{silindir} + k_{koni}} = \left(\frac{\pi E t}{L} D\right) \frac{\frac{1}{\left[\frac{1}{\left(\frac{D}{L}\right)} - \frac{(1-d/D)}{\tan \alpha}\right]} \frac{\sin \alpha \cos^2 \alpha}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}}{\frac{1}{\left[\frac{1}{\left(\frac{D}{L}\right)} - \frac{(1-d/D)}{\tan \alpha}\right]} + \frac{\sin \alpha \cos^2 \alpha}{\ln\left(\frac{D}{d}\right) \left(\frac{d}{D}\right)}} \quad (8)$$



Şekil 8: Bir ucu ankastre diğer ucu serbest konik silindirin koni açısına bağlı olarak katılık değişimi

Bu şekilde görüldüğü gibi optimal açı yaklaşık 35 derecedir [4]



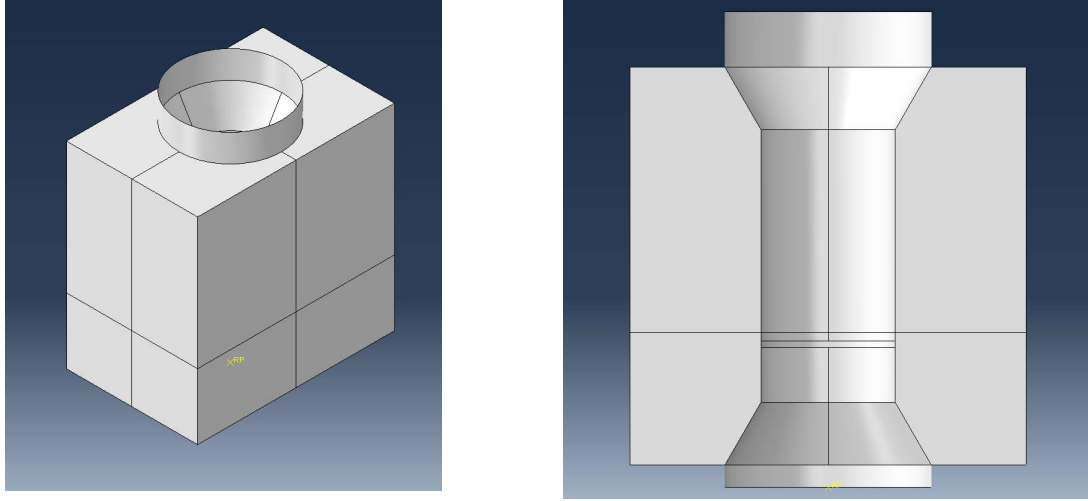
a) $\frac{d}{D} = 0.3$ ve $\frac{D}{L} = \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}$

b) $\frac{d}{D} = 0.6$, ve $\frac{D}{L} = \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}$

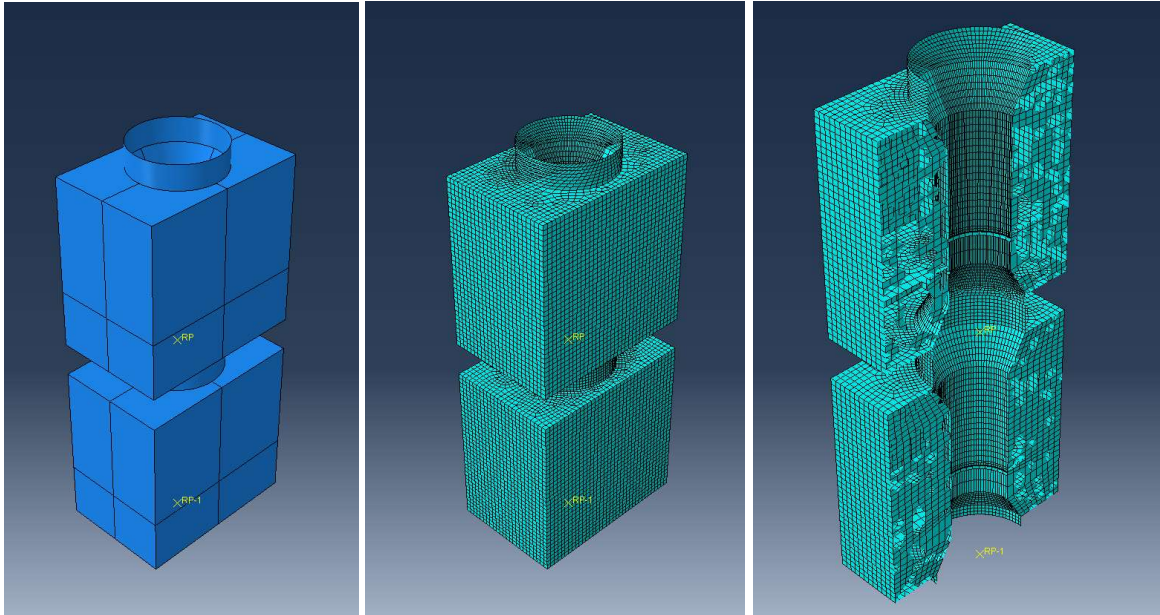
c) $\frac{d}{D} = 0.9$, ve $\frac{D}{L} = \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}$

Şekil 9: Düz bir silindir ($D = d$) aksel katılığı ile normalize edilmiş konik yapıli MS katılığının farklı $\frac{d}{D}$ ve $\frac{D}{L}$ oranları ile koni açısına bağlı olarak değişimleri

Şekil 9 da koni açısına bağlı olarak düz bir silindir ($D = d$) aksel katılığı ile normalize edilmiş konik yapıli MS katılığının farklı $\frac{d}{D}$ ve $\frac{D}{L}$ oranları ile değişimleri gösterilmiştir. Bu şekillerden teorik olarak şu sonuçlar çıkartılabilir. Birinci olarak, düşük koni açıları $15^\circ < \alpha < 45^\circ$ daha iyi aksel katılığı vermektedir. İkinci olarak, büyük çap/uzunluk oranı ($\frac{D}{L}$) ve açı büyüdükçe aksel katılık oranları düşmektedir. Minimum kütle için çoklu isterleri olan optimizasyon çalışması yapılması gerekmektedir. Hedef olarak minimum kütle ve maksimum katılık hedeflenmelidir. Bu çalışmanın devamı olarak belirtilen hususları göz önünde bulundurarak optimizasyon çalışması yapılması planlanmaktadır. Şekil 10 ve 11 de konik yapıli MS lerin tek ve üst üste konfigürasyonların sonlu elemanlar modelleri gösterilmiştir. Bu modellerin yukarıdaki ana parametrelere bağlı olarak sonlu elemanlar analizlerinin yapılarak eksen el ve yanal frekansları ile kritik burkulma yüklerinin parametrelere bağlı olarak ilişkilerinin yapılması geniş bir akademik çalışma gerektirmektedir. Bu nedenle burada belirtilmeyecektir.



Şekil 10: Uydu FE yapısal modeli ve kesiti



Şekil 11: Üst-üste uydu sonlu elemanlar modeli

UYGULAMALAR

Bu çalışmaya temel olan optimal MS li ve ilgili fırlatıcı isterlerini karşılayan gerçek haberleşme uydularını referans alınarak oluşturulacak gerçekçi uydu modelleri sonlu elemanlar modellenerek analizler yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı temel olarak ön tasarım için gerekli olan ana parametrelerle optimizasyon çalışması yapmaktır. Fakat yukarıda belirtilen parametreleri içeren analizler daha geniş bir çalışma gerektirdiğinden sadece modeller parametrik olarak oluşturulmuştur. Bu modeller ABAQUS sonlu elemanlar programında Python programlama dili kullanılarak skript olarak hazırlanmış olup geniş bir parametrik çalışmaya hazır hale getirilmiştir.

SONUÇ

Daha verimli, güçlü ve daha uzun süre görev ömrüne sahip haberleşme uyduları için etkin hacim kullanımı gerekmektedir. Merkezi silindireler ana yapısal elemanlar olarak kullanılmakta olup bunların daha verimli uydular için geometrik ve yapısal özelliklerinin optimizasyon çalışmaları ile iyileştirme yapılması gerekmektedir. Ana olarak minimum kütle ve iç hacim kriterlerinin yanında maksimum katılık kriterleri içinde sağlanması gerekmektedir.

Bu çalışmada daha etkin hacim kullanımı için tasarlanan iki ucu eşit konik ortası düz silindirden oluşan MS lerin minimum kütle ve hacim için teorik optimizasyon çalışması yapılmıştır. Silindirden konik kesite geçiş açısı ana parametre olarak alınarak minimum kütle için optimum açısı koni çaplarının oranına (d/D) bağlı olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla optimum kütle sadece ana olarak (d/D) oranına bağlı olduğu gösterilmiştir. Bu optimal açı sadece geometrik açıdan en az hacimi elde etmek için bulunmuştur. MS lerin diğer alt-sistem ve fırlatıcı yapısal isterleride karşılaması gerekmektedir. Ana yapısal isterleri uydu dik ve yanal yöndeki frekans değerleridir. MS lerin bu yapısal isterler e görede analiz ve testleri yapılır. Bu optimizasyon çalışmasında basit yapısal modeller kullanılarak MS lerin katılık modelleri de geliştirilmiştir. Bu formülasyonlar ön tasarım için gerekli çözümleri analitik olarak sunmaktadır dolayısıyla bu çalışma uydu ana taşıyıcısı olan MS tasarımında faydalı olacaktır. Daha detaylı çalışma için gerçek modellerin üretilip test edilerek teorik sonuçların gerçek modellerle doğrulanması önerilmektedir. Fakat bu tür yapısal elemanların üretimi ve testleri pahalı olduğundan küçük boyutlarda üretilip test edilerek çalışmanın doğrulanması mümkün olabileceği öngörülmektedir.

Bilgilendirme

Yazar bu çalışmaya verdiği destek ten dolayı TÜRK HAVACILIK VE UZAY SANAYİ (TUSAŞ) şirketine teşekkür etmektedir.

Kaynaklar

Ariane 5, *Ariane 5 User's Manual*, erişim tarihi Ağustos 08, 2020
<https://www.arianespace.com/vehicle/ariane-5/> kaynağında

Falcon X, *Falcon X, User's Guide*, erişim tarihi Ağustos 08, 2020
https://www.spacex.com/media/falcon_users_guide_042020.pdf kaynağında

Proton, *Proton Launch System Mission Planner's Guide*, Rev. 7, July 2009 erişim tarihi Ağustos 08, 2020
<https://www.ilslaunch.com/launch-services/proton-mission-planners-guide/> kaynağında

Young, W.C., *Roark's Formulas for Stress and Strain*, 6th Ed., 1989, McGraw-Hill, New York, USA.