



Makale

Uzay Antenleri İçin Açılabilen Arkası Esnek Takviyeli Reflektör Tasarımı

Ömer SOYKASAP

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyonkarahisar

ÖZET

Geleceğin uzay görevleri Ku-band radyo frekanslarında çalışacak telekomünikasyon antenleri, dünya gözetleme ve bilimsel araştırmalar için daha yüksek frekansta çalışacak antenler için büyük açılabilen reflektörlere ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada Ku-band frekans gereksinimlerini sağlayan 6m çapındaki açılabilen arkası esnek reflektör ilgili tasarım yapılmaktadır. Reflektör üç eksenli dokümalı karbon takviyeli plastikten yapılmış olup, ön tarafı ince kabuk yapısına ve arkası ise esnek takviyeli bir yapıya sahiptir. Reflektör mekanik performansını belirlemek için termo-elastik, doğal frekans, burkulma ve geçiş dinamik analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu Elemanlar, Gerilim Şiddet Faktörü, Çatlak Mesafesi

1. GİRİŞ

Büyük açılabilen uzay yapıları için uygulama amacına göre farklı konseptler geliştirilmektedir. Bu tür yapılar için genellikle yüksek katılık/kütle oranı, uzaya götürülebilmesi için küçük hacme paketlenmesi ve uzayda paketlenmeden önceki konumuna açılabilmesi gerekmektedir [1]. Arkası esnek takviyeli reflektör (AETR) konsepti ince esnek karbon takviyeli plastik (CFRP) kabuk yapısına sahiptir ve herhangi bir menteşe yada ara bağlantı elemanı olmadan katlanabilmektedir. Ku-band ve S-band antenler için pek çok konsept yakında incelenmiş ve AETR konsepti gösterdiği üstün performans açısından detaylı çalışılmaya uygun bulunmuştur [2]. Reflektörün katlama prensibi basittir: reflektörün karşılıklı kenarları birbirine doğru çekilir ve orijinal uzaklığın yarısına gelindiğinde bağlama kabloları ile bağlantı yapılır. Katlanmış haldeki en büyük boyut, açılı haldeki çaptan bir miktar daha büyüktür. Uzaya gönderilip yörüngede iken reflektörü tutan kablolar serbest bırakılır ve yapıda depo edilen elastik enerjinin serbest bırakılması ile dinamik olarak açılım sağlanır.

Orijinal konsept Hughes tarafından tasarlanan arkası esnek reflektöre dayanmaktadır (bkz. Şekil 1). Reflektörün elastik olarak katlanabilmesi için düşük eğilme rijitliği gerekmektedir. Ancak bu yörüngede açılmış halde iken yüksek şekil doğruluğunun sağlanmasını ve başarılmasını güçleştirmektedir. Ayrıca çok fazla esnek haldeki yapı imalat sonrasında ortaya çıkan şekil bozukluklarına sebep olmaktadır. Bu problemleri çözmek için reflektörün kenarı boyunca katlanabilen bir takviye ilave edilmiştir [3]. Kenar takviyesi açılmış haldeki eğilme rijitliğini önemli derecede artırmakta ve de yeni reflektörün katlanmasına izin vermektedir. AETR yekparedir, menteşe yada bağlanma elemanı kullanılmamaktadır, dolayısı ile maliyetlerde önemli ölçüde azalma sağlanmaktadır. Reflektörün 0.8 çaplı modeli Şekil 2 de verilmektedir. Reflektör mekanik performansını belirlemek için Abaqus [4] sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş, termo-elastik, doğal frekans, burkulma ve geçiş dinamik analizleri yapılmıştır.



Şekil 1. Hughes 4.5 m çapındaki reflektör (iki reflektör içiçe katlanmış) .



Şekil 2. 0.8 m çapında AETR model

2. KONFIGÜRASYON VE SONLU ELEMANLAR MODELİ

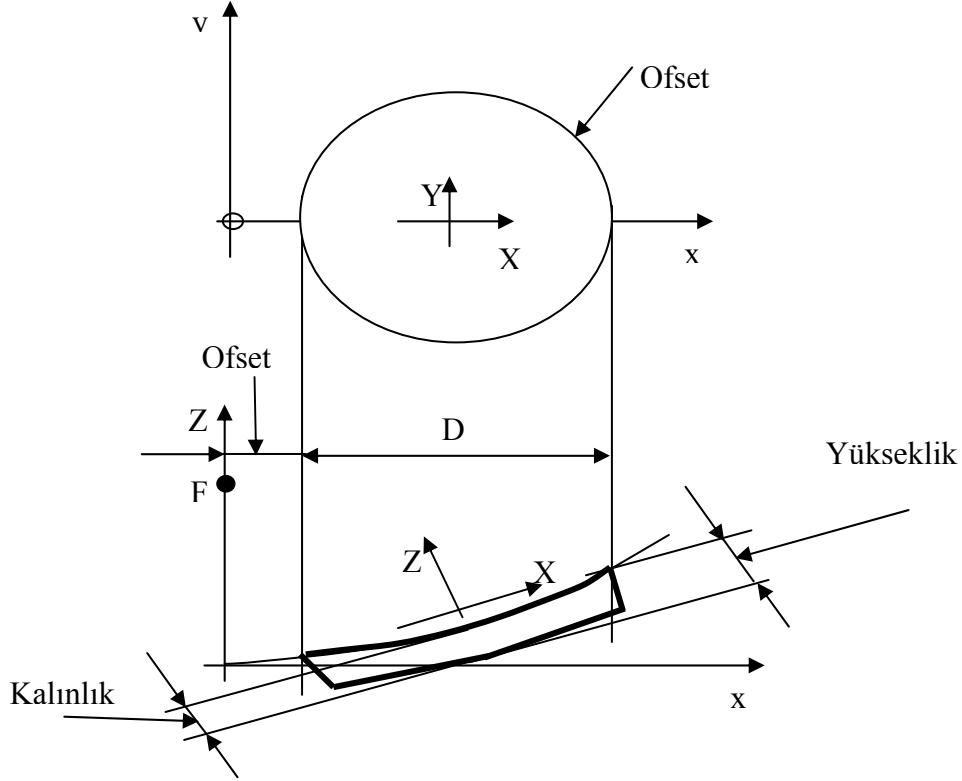
Reflektör parametreleri şu şekildedir: ap $D=6$ m, odak uzunluğu $F=4.8$ m, reflektör ofset 0.3 m (bkz. Şekil 3). Ofset parabolik yüzey bir ana paraboloidin bir silindir ile keşişimi ile elde edilmektedir. Ana paraboloidin global eksen takımındaki denklemi şu şekildedir:

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4F} \quad (1)$$

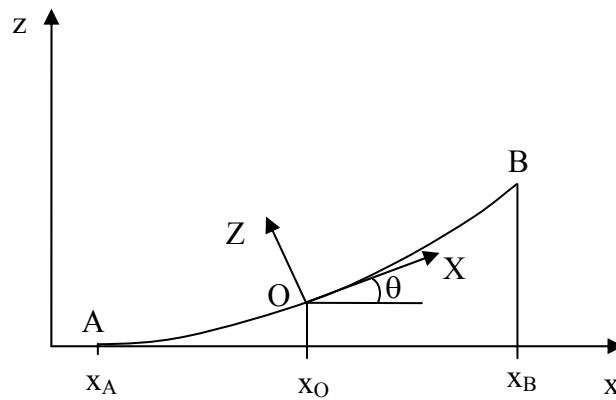
burada F odak uzunluğudur. Termal yükleri uygulamak için geometrik merkezde lokal koordinat sistemi XYZ şu şekilde tanımlanabilir: orijin $X_O = (X_A + X_B)/2$ dedir, X eksenini yansıtıcı yüzeye geometrik merkezde teğettir ve $y = Y$. İki eksen takımında şu ilişkiler yazılabilir (bkz. Şekil 4):

$$\theta = \arctan\left(\frac{x_O}{2F}\right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} X &= \cos \theta (x - x_0) + \sin \theta \left(z - \frac{x_0^2}{4F} \right) \\ Z &= -\sin \theta (x - x_0) + \cos \theta \left(z - \frac{x_0^2}{4F} \right) \end{aligned} \quad (3)$$



Şekil 3. Reflektör geometrisi.



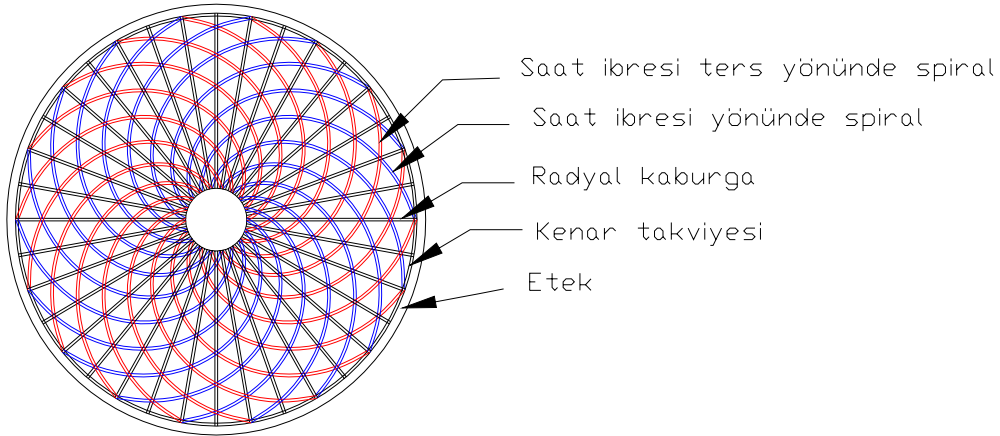
Şekil 4. Lokal ve global eksen takımları.

Reflektör yapısında sadece üç eksenli (0,±60) dokumalı CFRP kullanılmaktadır. Malzeme özellikleri şunlardır: fiberler T300, elastik modülü 30 GPa, Poisson oranı 0.5, yoğunluk 920 kg/m³, termal genişleme katsayısı CTE=0.2 x 10⁻⁶ / °C. Tasarım Şekil 5 de görüldüğü gibi şu parçalardan oluşmaktadır:

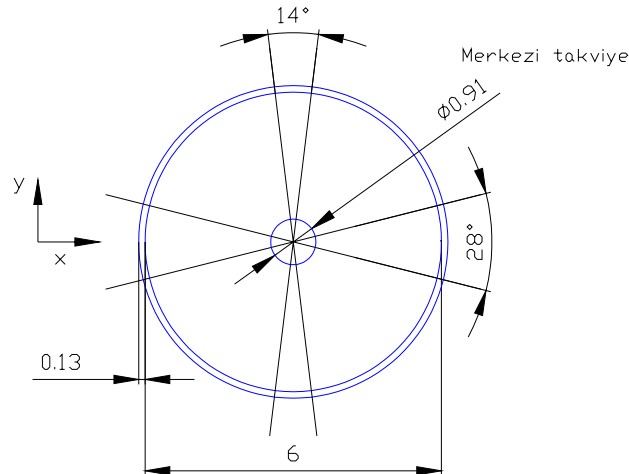
- reflektör kabuğu (kalınlık = 0.39 mm),
- kenar takviyesi (genişlik = 130 mm, kalınlık = 1.95 mm);
- etek takviyesi, 36 radyal kaburga, 18 saat ibresi yönünde ve 18 saat ibresi aksi yönünde spiral takviyeler (hepsi de genişlik = 40 mm, kalınlık = 0.66 mm),
- bir merkezi takviye (ap = 913 mm, kalınlık = 1.98 mm).

Kenar takviyesine reflektör kabuk yapısına evre boyunca bağlı ancak katlanmaya izin vermesi için simetrik dört yarık ilave edilmiştir. Şekil 6’te bu yarıkların yeri 14° ve 28° lik merkezi aırlarla verilmektedir.

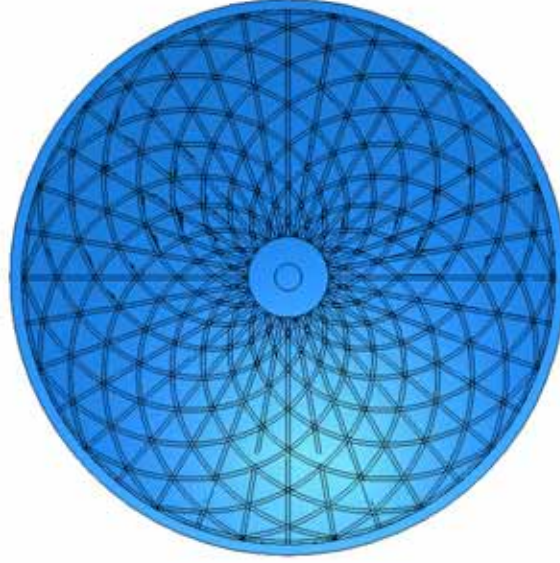
Takviye elemanlarının boyutları Ref.[3] de optimize edilen 4.6 m çapındaki reflektör modelinden ölçeklenmiştir. Abaqus sonlu elemanlar modeli Şekil 7’de verilmektedir. Reflektör üç boyutlu kabuk yapısı olarak modellenmiştir. Her bir parça ayrı oluşturulmuş ve asamble modülünde bir araya getirilmiştir. Bütün takviye elemanları reflektör kabuk yapısına rijit bir Őekilde bağlanmıştır. Yapının tamamı 3 düğümlü genel amaçlı üçgen kabuk elemanları (S3) ile bölünmüştür. Reflektör kabuğu toplam 6688 sonlu elemandan oluşmaktadır.



Şekil 5. Tam ölçekli AETR konfigürasyonu.



Şekil 6. AETR detayları (boyutlar metre) ve global koordinat sistemi.



Şekil 7. AETR sonlu elemanlar modeli.

3. MEKANİK PERFORMANS

a. Termal Analiz

Yörüngede oluşacak termal değişiklikler reflektör yüzeyinde şekil bozukluklarına sebep olmakta ve performansta azalmalara sebep olmaktadır. Termal şekil bozuklukları analizi için AETR nin serbest sınır şartlarına sahip olduğu kabul edilmiştir. Üç eksenli dokümal kompozit malzeme için deneysel verilere dayalı sıcaklık genleşme katsayıları $\alpha_x = \alpha_y = -0.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ dır. Göz önüne alınan termal yükler şu şekildedir:

LC1: Reflektörün uzunluğu boyunca etkin, X doğrultusunda 100°C lik bir eğim.

LC2: Kalınlık boyunca eğim: $0.1^\circ\text{C}/\text{mm}$ (reflektör yüzeyinin normali doğrultusunda).

LC3: Üniform mutlak sıcaklık, -150°C .

LC4: Üniform mutlak sıcaklık, 170°C .

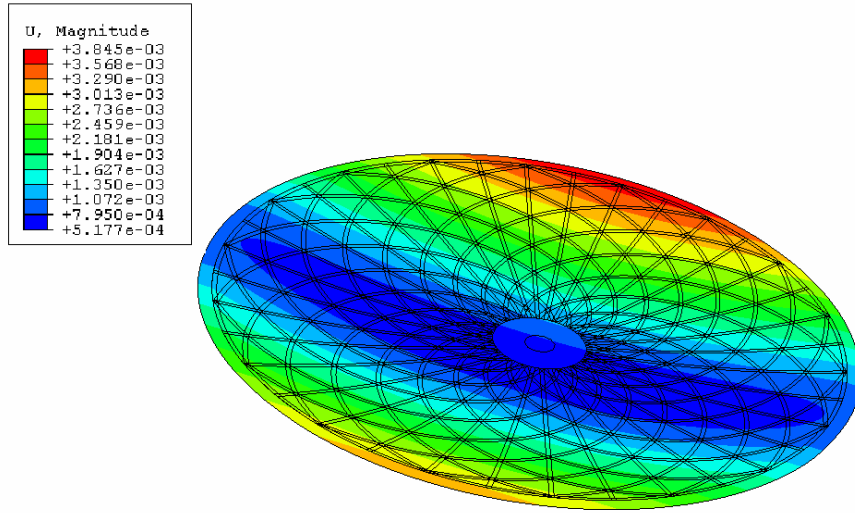
Yukarıdaki termal yük halleri ve kombinasyonları başlangıç referans sıcaklığı 20°C alınarak reflektör yapısına uygulanmış ve herbir yükleme durumu için reflektör yüzey hataları en iyi paraboloid göre ortalama kök hatası (RMS) hesaplanarak bulunmuştur. En iyi paraboloid şu parametrelere dayanarak hesaplanmıştır:

- F: En iyi uyuşan yüzeyin odak uzunluğu
- α : x- ekseninde 1. dönüşüm açısı; (x, y, z) den (x', y', z') e dönüşüm
- β : y'-ekseninde 2. dönüşüm açısı: (x', y', z') den (x'', y'', z'') e dönüşüm
- k_o : z'' doğrultusu boyunca paraboloidin tepe noktasının hareketi

Termal şekil bozukluğu analizinin sonuçları Tablo 1'de verilmektedir. Buna göre en fazla RMS hatası LC1+LC2+LC3 halinde oluşmakta ve 0.00352 mm dir. Bu hal için yer değiştirme büyüklükleri Şekil 8'de verilmektedir.

Tablo 1. Termal yukler için RMS hataları.

Yuk hali	RMS (mm)	α (rad)	β (rad)	k_0 (mm)	F (mm)
LC1	0.00284	-5.06751E-04	-9.08656E-04	3.49569	4800.1
LC2	0.00020	-1.96292E-05	1.55700E-04	-0.13710	4800.0
LC3	0.00037	5.62369E-06	1.40150E-05	-0.10882	4800.2
LC4	0.00037	-4.90661E-06	-1.27578E-05	0.09650	4799.8
LC1+LC2+LC3	0.00352	-5.13168E-04	-8.50751E-04	3.53070	4800.3
LC1+LC2+LC4	0.00285	-5.23748E-04	-8.77730E-04	3.73617	4799.9



Şekil 8. LC1+LC2+LC3: yer değiştirme büyüklükleri (m).

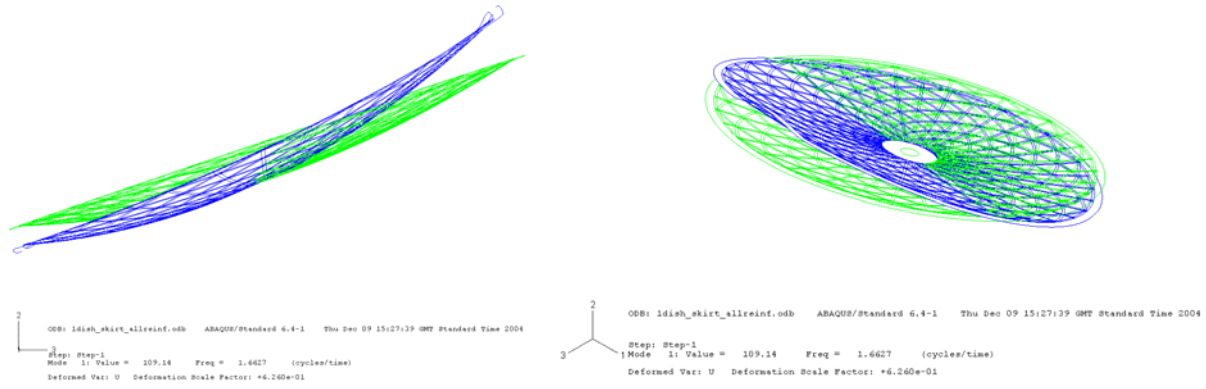
b. Modal Analiz

Modal analizler doğal frekans ve doğal modların bulunması için şu iki durumda yapılmıştır: (i) reflektör geometrik merkezde bir rijit arayüze bağlı, (ii) reflektör geometrik merkezde  parçalı bir kola bağlı.

Birinci durum için geometrik merkezde 200 mm çap içerisindeki bütün düğüm noktaları ankastre olarak sabitlenmiştir. Doğal frekans değerleri Tablo 2’de ve ilk mod Şekil 9’da verilmektedir. İlk mod y-ekseni etrafında dönüş modudur.

Tablo 2. Doğal frekanslar (reflektör rijit arayüze bağlı).

Mod	Rijit destek Frekans (Hz)
1	1.66
2	1.82
3	1.86
4	2.01
5	4.22
6	4.64
7	5.32
8	5.98
9	10.20
10	10.53

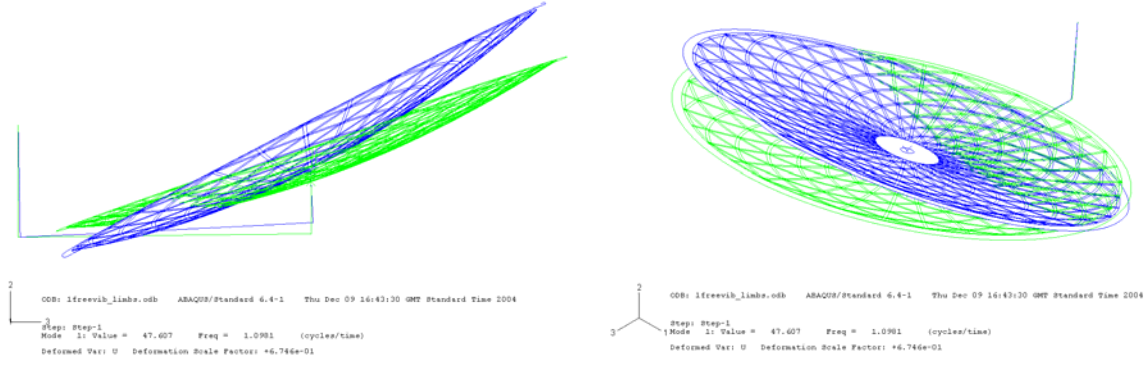


Şekil 9. Birinci mod ($f=1.66$ Hz): baz hali (yeşil), mod şekli (mavi).

İkinci durumda reflektör üç parçalı bir kola bağlanmıştır (detaylar için bkz Ref. 3). 200 mm çapında, 2 mm et kalınlıklı bir boru yapısına sahip farklı uzunluklu parçalar birbirine menteşelerle bağlıdır. Kolu bir ucu sabit uzay aracına diğer ucu ise merkezde reflektör yapısına bağlıdır. Kolu oluşturan parçalar (elastik modülü 90 GPa, Poisson oranı 0.33, yoğunluk 2000 kg/m^3) bir boyutlu kiriş eleman olarak modellenmiştir. Kolu reflektör ile bağlantısını daha iyi temsil etmek için reflektörün merkezinde 200 mm çap içerisindeki bütün düğüm noktaları çok noktalı kısıtlar kullanılarak merkezde tek bir referans noktasına bağlanmış ve referans noktası da bir menteşe ile kola bağlanmıştır. Sonuçlar Tablo 3’de ve ilk mod Şekil 10’da verilmektedir. Reflectörün kola bağlanması bir miktar ilk doğal frekans değerinde düşmeye neden olmuştur. Bu da kolu rijitliğinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 3. Doğal frekanslar (reflektör üç parçalı kola bağlı).

Mod	Kola bağlı, frekans (Hz)
1	1.10
2	1.24
3	1.66
4	1.82
5	1.93
6	2.11
7	4.20
8	4.68
9	5.33
10	5.91



Şekil 10. Birinci mod (frekans 1.1 Hz) baz hali (yeşil), mod şekli (mavi).

c. Lineer Dinamik Geçiş Analizi

Uzay aracı davranış ve kontrol sisteminden kaynaklanan yörüngede oluşacak tahrik sonucu reflektörün cevabı için lineer dinamik geçiş analizi yapılmaktadır. Reflektörün yörünge ivmelenmelerine cevabını incelemek için doğrusal 1 m/s^2 lik ivme yükleri global eksenler x, y, z doğrultusunda ayrı ayrı uygulanmıştır. Reflektör yine üç parçalı kola bağlıdır. Dinamik geçiş cevabı modal analiz kullanılarak elde edilmiştir. Dinamik cevap ilk 20 modun süperpozu ile ve her bir mod için %1 modal sönüm kullanılarak elde edilmiştir. Zaman entegrasyonu ilk 4 saniye için yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 4'de verilmektedir. Buna göre maksimum yer değiştirme büyüklüğü takviye kenarın ucunda gerçekleşmektedir.

Her bir ivmelenmeye karşı odak noktası yer değiştirmeleri, reflektörün maksimum yer değiştirme anı için hesaplanmıştır ve Tablo 5'de verilmektedir. Odak noktasının en fazla yer değişimi z-doğrultusu boyunca ivmelenmeden kaynaklanmaktadır. Çünkü bu doğrultuda kolun eğilme rijitliği en azdır.

Tablo 4. 1 m/s^2 lik adım ivme yüküne karşı dinamik cevap.

İvme yönü	Yer değiştirme (cm)	Konum
x	1.44	Takviye ucu
y	1.42	Takviye ucu
z	4.95	Takviye ucu

Tablo 5. 1 m/s^2 lik ivmelenmeye karşı odak noktası yer değiştirmeleri.

Birim ivmelenme yönü	Odak noktası yer değişimi (mm)		
	x	y	z
x boyunca	12.7	-1.5	6.7
y boyunca	-0.1	10.8	-0.5
z boyunca	-42.8	-0.5	-19.5

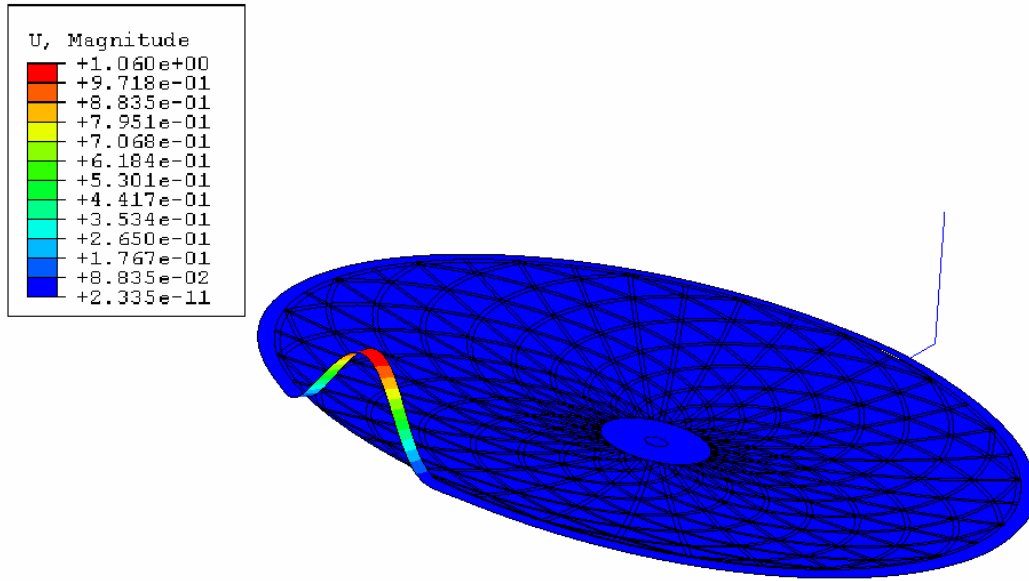
d. Statik Burkulma Analizi

Bu analizin amacı yörüngedeki ivmelenmelerden dolayı reflektörün hangi parçalarının statik burkulmaya karşı daha hassas olduğunun belirlenmesidir. Yine birim doğrusal ivmeler statik ve birbirinden bağımsız olarak x, y, z doğrultularında uygulanmıştır. Reflektör kola bağlı halde iken sonuçlar Tablo 6'da

verilmektedir. En düşük burkulma yükü z-doğrultusunda 13.2 m/s^2 lik bir ivmelenme yüküne karşılık gelmektedir ve Şekil 11'de görüldüğü gibi kenar takviyesinin menteşe kısmında lokal bir burkulma modu vermektedir.

Tablo 6. Burkulma yükleri (reflektöre kola bağı).

Mod	Burkulma yükleri (m/s^2)		
	x-yönü	y- yönü	z- yönü
1	76.91	81.60	13.20
2	115.10	119.73	14.11
3	148.05	169.40	25.26
4	198.95	201.97	27.59
5	215.96	209.08	27.92
6	239.76	247.00	29.64
7	302.82	264.33	53.57
8	322.29	267.31	54.50
9	336.85	352.71	54.67
10	365.00	357.15	58.73



Şekil 11. Birinci burkulma modu.

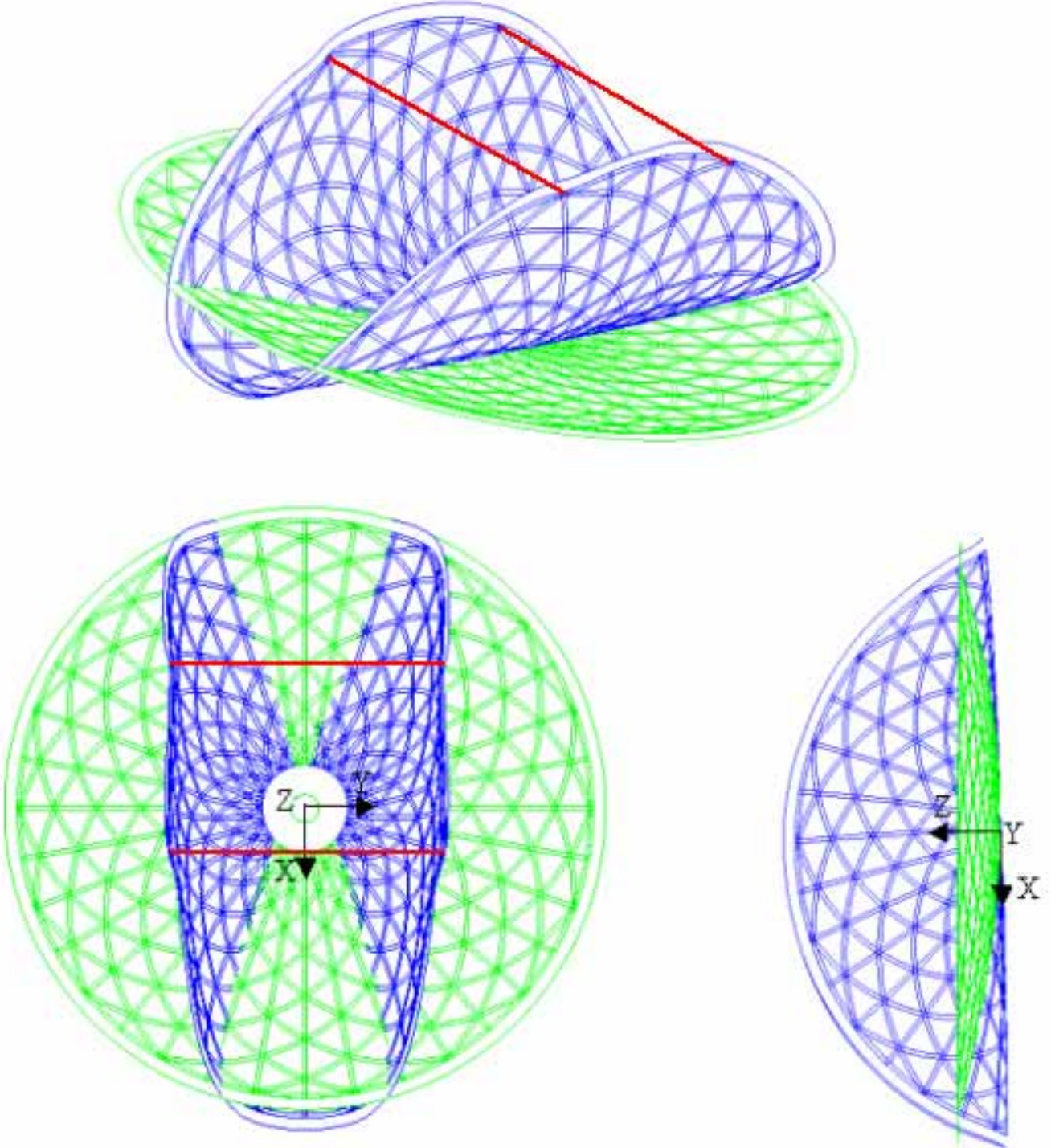
e. Katlama Analizi

Katlama için reflektörün çapa göre karşılıklı iki kenarı orijinal mesafenin L_0 yarısı kadar birbirine çekilmektedir. Reflektör katlandığında iki bağlama kablosu ile tutulmaktadır. Tek kablo ile simülasyon ilk önce düşünülmesine rağmen bu durumdaki gerilme ve birim uzama değerleri malzemenin mukavemet değerlerini aştığı için bundan vazgeçilmiştir.

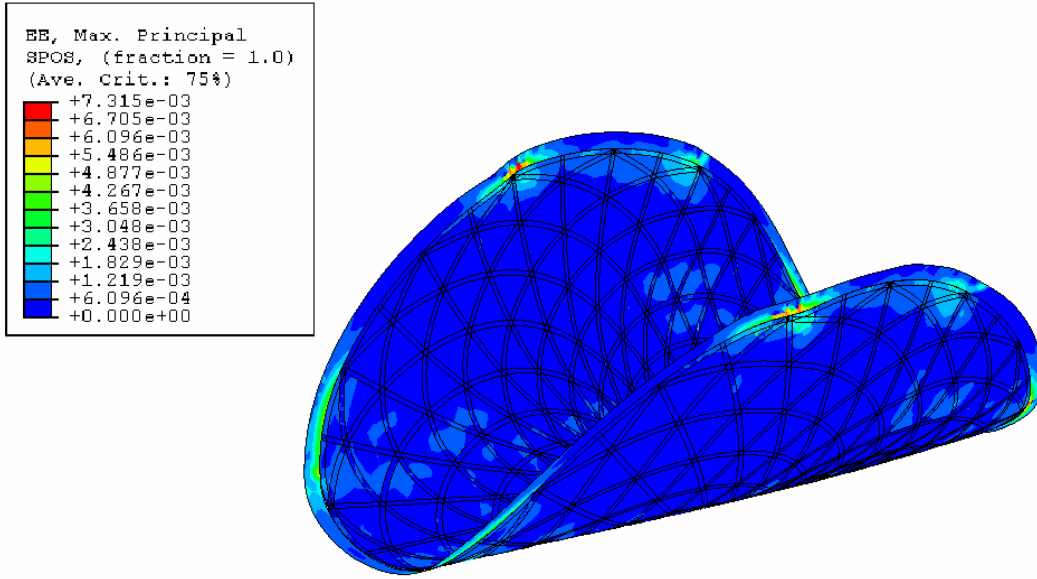
Katlama simülasyonu doğrusal olmayan (nonlinear) statik analiz olarak yapılmıştır. Reflektörün kenarındaki karşılıklı iki çift düğüm noktasına önceden belirlenmiş yer değiştirmeler uygulanmıştır. Her bir çiftteki iki düğüm noktası birbirinden 2181 mm mesafede, ve karşılıklı çiftler birbirinden başlangıçta

$L_0=5634$ mm ayırtık. L_0 reflektörün katlanması için iki kenarın birbirine bağlandığı kablonun başlangıçtaki uzunluğu olarak düşünölebilir. Şekil 12 reflektörün açılmış ve katlanmış hallerini vermektedir. Őekilde katlanmış hal karőılaőtırma için açık halin merkezine kaydırılmıőtır.

Reflektör ofset konfigürasyona sahip olduğu için, orijine yakın kenarı başlangıçta uzak kenardan daha fazla eğriliğe sahiptir, bu da simetrik olmayan bir katlamaya neden olmaktadır. Şekil 13 katlanmış haldeki maksimum asal birim uzamaları vermektedir. Maksimum birim uzama % 0.7 olup takviye kenarında oluőtmaktadır ve malzemenin mukavemet değerinden daha düőtüktür.



Şekil 12. Reflektör açılmış halde (yeşil) ve katlanmış halde (mavi); bağlama kabloları (kırmızı).



Şekil 13. Katlanmış haldeki maksimum asal birim uzamalar.

4. SONUÇLAR

Açılabilen arkası esnek bir reflektörün sonlu elemanlar modeli Abaqus'ta yapılmış, mekanik performansı incelenmiştir. Reflektör yüksek yüzey doğruluğuna (düşük yüzey hatası RMS) sahiptir. Reflektör mekanik performansı termo-elastik, doğal frekans, burkulma ve geçiş dinamik analizleri ile incelenmiştir. Buna göre şu sonuçlara varılmaktadır:

- Toplam kütle: 25.52 kg
Yansıtıcı yüzey: 11.66 kg, kenar takviyesi: 4.91 kg, diğer takviyeler: 8.95 kg.
- Termal şekil bozukluklarından dolayı maksimum yüzey hatası RMS: 0.00352 mm.
- Doğal frekans:
1.66 Hz (birinci mod), reflektör geometrik merkezde sabit
1.10 Hz (birinci mod), reflektör bir kola bağlı
- Birim doğrusal ivmelenmeye dinamik cevap:
Maksimum yer değiştirme büyüklüğü kenar takviyesinin ucunda oluşur, 4.95 cm (reflektör bir kola bağlı iken)
Maksimum odak yer değiştirme z-yönünde ivmelenmeden oluşur ve 42.8 mm.
- Yörüngedeki ivmelenmeden dolayı statik burkulma:
En düşük burkulma yükü 13.2 m/s^2 dir ve z doğrultusundaki ivmelenmeden kaynaklanmaktadır.
- Katlama:
Simetrik olmayan bir katlama oluşmakta, maksimum birim uzama % 0.7 dir ve kenar takviyesinde oluşur.

KAYNAKLAR

1. Soykasap, Ö., Watt, A.M. and Pellegrino, S. "New Deployable Reflector Concept," *Proceedings of the 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Palm Springs, CA, 19 – 22 Nisan, 2004, AIAA Paper 2004-1574.
2. Datashvili, L., Lang, M., Zauner, Ch., Baier, H., Soykasap, Ö., Tan, L.T., Kueh, A., and Pellegrino, S. . *Reflector Concepts Analysis*. Technical Report WP1000, LLB-R-12/07/04-02D-02, Institute of Lightweight Structures, Aerospace Department, Technical University of Munich. For ESA Contract number 16757/02/NL/LvH/bj, "Technical Assessment of High Accuracy Large Space Borne Reflector Antenna" (TAHARA), 2004.
3. Tan, L.T. and Pellegrino, S. (2004). Ultra thin deployable reflector antennas. In Proc. 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 19-22 Nisan 2004, Palm Springs, CA AIAA 2004-1730.
4. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.4., Pawtucket, RI, USA, 2004.