

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPOZİT MALZEMELERDE ELYAF BURKULMASININ SAYISAL
OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Bora AKSOYLU**

Anabilim Dalı: DİSİPLİNLERARASI

Programı: UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ

ŞUBAT 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPOZİT MALZEMELERDE ELYAF BURKULMASININ SAYISAL
OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Bora AKSOYLU
511041010**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ocak 2007**

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Halit Süleyman TÜRKMEN

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Zahit MECİTOĞLU(İ.T.Ü.)

Doç.Dr. Ata MUĞAN(İ.T.Ü.)

ŞUBAT 2007

ÖNSÖZ

Kompozit malzemelerde elyaf burkulmasının incelendiği bu çalışmada bana destek olan ve yol gösteren, çalışmanın tamamlanmasını sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Halit Süleyman Türkmen'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen dostlarım Uçak Mühendisi Fatih DÜŞEL'e, Uçak Mühendisi Erman PİLEVNE'ye ve manevi desteklerini eksik etmeyen tüm arkadaşlarıma bu süre içerisindeki yardımları için teşekkür ederim.

Bu çalışma, sadece bu tez aşamasında değil, senelerdir her konuda yanımda durmuş ve bana destek olmuş olan sevgili aileme adanmıştır. Sonsuz teşekkürlerimle.

ARALIK 2006

BORA AKSOYLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1 GİRİŞ	1
1.1 Önceki çalışmalar	1
1.2 Kompozit Malzemelerin Havacılıkta Uygulamaları	6
1.3 Çalışmanın amacı ve kapsamı	7
2 ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER	9
2.1 Kompozit Malzemeler	9
2.2 Elyaf Türleri	13
2.1.1 Cam Elyaf	13
2.1.2 Bor Elyaf	15
2.1.2 Karbon Elyaf	15
2.3 Matris Elemanları	17
2.4 Kompozitlerin Mekanik Özellikleri	17
2.4.1 Mikromekanik Özellikler	17
2.4.2 Makromekanik Özellikler	18
3 ANALİZLER	19
3.1 Bor Elyaf Analizi	19
3.1.1 Teorik Hesap	19
3.1.2 Bir Boyutlu Elemanlar Kullanılarak Bor Elyaf Analizi	19
3.1.3 Üç Boyutlu Elemanlar Kullanılarak Bor Elyaf Analizi	21
3.2 Cam Elyaf Analizi	23
3.2.1 Teorik Hesap	23
3.2.2 Üç Boyutlu Elemanlar Kullanılarak Cam Elyaf Analizi	23
3.3 Karbon Elyaf Analizi	25
3.3.1 Teorik Hesap	25
3.3.2 Üç Boyutlu Elemanlar Kullanılarak Karbon Elyaf Analizi	25
3.4 Elyaf-Matris Sistemi Analizi	27
3.5 Matris İçinde Dörtlü Elyaf Analizi	28
3.6 Yay-Elyaf Sistemi Analizi	30
4 SONUÇLAR	32
4.1 Bir Boyutlu Elemanlar Kullanılarak Yapılan Bor Elyaf Analizi Sonuçları	32
4.2 Üç Boyutlu Elemanlar Kullanılarak Yapılan Bor Elyaf Analizi Sonuçları	33
4.3 Cam Elyaf Analizi Sonuçları	33
4.4 Karbon Elyaf Analizi Sonuçları	34
4.5 Sabit Olmayan Elyaf Matris Sistemi Analizi Sonuçları	35
4.6 Sabit Elyaf Matris Sistemi Analizi Sonuçları	36
4.7 Dörtlü Elyaf Matris Sistemi Analizi Sonuçları	37
4.8 Yaylı Elyaf Sistemi Analizi Sonuçları	37
4.9 Kritik gerilmeler	39

5 YORUM	47
KAYNAKLAR	50
EKLER	54
ÖZGEÇMİŞ	117

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No.</u>
Tablo 2.1: Cam elyaf tiplerinin özellikleri	14
Tablo 2.2: Bor elyafların dayanımları	15
Tablo 2.3: Çeşitli elyafların malzeme özellikleri.....	16
Tablo 2.4: Çeşitli elyafların boyutları, imalat yöntemleri ve örnekleri	16
Tablo 3.1: Bir boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan bor elyaf analizinde kullanılan veriler.....	20
Tablo 3.2: Üç boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan bor elyaf analizinde kullanılan veriler.....	22
Tablo 3.3: Üç boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan cam elyaf analizinde kullanılan veriler.....	24
Tablo 3.4: Üç boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan karbon elyaf analizinde kullanılan veriler.....	25
Tablo 3.5: Bor elyaf-matris analizinde kullanılan veriler	27
Tablo 3.6: Dörtlü bor elyaf-matris analizinde kullanılan veriler.....	29
Tablo 3.7: Bor elyaf-yay analizinde kullanılan veriler	31
Tablo 4.1: Bir boyutlu eleman kullanılarak yapılan bor elyaf analizi kritik yük değerleri	32
Tablo 4.2: Bir boyutlu eleman kullanılarak yapılan bor elyaf analizi serbest titreşim frekans değerleri	32
Tablo 4.3: Üç boyutlu eleman kullanılarak yapılan bor elyaf analizi kritik yük değerleri	33
Tablo 4.4: Üç boyutlu eleman kullanılarak yapılan bor elyaf analizi serbest titreşim frekans değerleri	33
Tablo 4.5: Üç boyutlu eleman kullanılarak yapılan cam elyaf analizi kritik yük değerleri.....	33
Tablo 4.6: Üç boyutlu eleman kullanılarak yapılan cam elyaf analizi serbest titreşim frekans değerleri	33
Tablo 4.7: Karbon elyaf analizinde ortotropik malzeme seçilerek elde edilen kritik yük değerleri	34
Tablo 4.8: Karbon elyaf analizinde ortotropik malzeme seçilerek elde edilen serbest titreşim frekans değerleri.....	34
Tablo 4.9: Karbon elyaf analizinde izotropik malzeme seçilerek elde edilen kritik yük değerleri	35
Tablo 4.10: Karbon elyaf analizinde izotropik malzeme seçilerek elde edilen serbest titreşim frekans değerleri.....	35
Tablo 4.11: Sabit olmayan elyaf-matris analizinde elde edilen kritik yük değerleri	36
Tablo 4.12: Sabit elyaf-matris analizinde elde edilen kritik yük değerleri	36
Tablo 4.13: Dörtlü elyaf-matris analizinde elde edilen kritik yük değerleri.....	37
Tablo 4.14: Yaylı elyaf analizinde elde edilen kritik yük değerleri	37
Tablo 4.15: Yaylı elyaf analizinde elde edilen serbest titreşim frekans değerleri.....	38

Tablo 4.16: Bir boyutlu elemanlar kullanılarak elde edilen kritik burkulma yükleri	38
Tablo 4.17: Bir boyutlu elemanlar kullanılarak elde edilen kritik burkulma yükleri	38
Tablo 4.18: Sistemler için kritik gerilme değerleri.....	39

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No.</u>
Şekil 3.1: BEAM4 eleman şekli.....	20
Şekil 3.2: SOLID186 eleman şekli.....	21
Şekil 3.3: Üç boyutlu bor elyaf modeli.....	22
Şekil 3.4: Cam elyaf modeli.....	24
Şekil 3.5: Karbon elyaf modeli	26
Şekil 3.6: Elyaf-matris sistemi modeli	28
Şekil 3.7: Dörtlü elyaf matris sistemi modeli	30
Şekil 3.8: COMBIN14 eleman şekli.....	31
Şekil 3.9: Yay-elyaf sistemi modeli	31
Şekil 4.1: Bir boyutlu ve üç boyutlu elyaf analizi kritik yük grafiği.....	41
Şekil 4.2: Bir boyutlu ve üç boyutlu elyaf analizi serbest titreşim frekans grafiği.....	41
Şekil 4.3: İzotropik ve ortotropik karbon elyaf analizi kritik yük grafiği	42
Şekil 4.4: İzotropik ve ortotropik karbon elyaf analizi kritik yük grafiği	43
Şekil 4.5: Cam elyaf ve karbon elyaf analizi kritik yük grafiği	43
Şekil 4.6: Cam elyaf ve karbon elyaf serbest titreşim analizi frekansları karşılaştırma grafiği.....	44
Şekil 4.7: Sabit ve sabit olmayan elyaf-matris analizleri kritik yük grafiği	45
Şekil 4.8: Bor elyaf ve yaylı system analizleri kritik yük değerleri grafiği.....	46
Şekil 4.9: Bor elyaf ve yaylı sistem analizleri serbest titreşim frekans değerleri grafiği.....	46
Şekil 4.10: Bir boyutlu ve üç boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan elyaf yay sistemi analizleri kritik yük değerleri	47
Şekil 4.11: Elyaf-yay($k=1500$) ve elyaf-matris analizleri kritik yük karşılaştırmaları	48

ÖZET

Bu çalışmada kompozit malzemelerdeki elyafların burkulması incelenmiştir. Yapılan benzer konudaki literatür araştırmasının ardından, tek taraftan sabitlenmiş elyaflara uygulanan yükün sonucunda oluşan burkulma analizi, ANSYS programı yardımıyla araştırılmıştır. Öncelikle bor-elyaf için 3 boyutlu ve tek boyutlu modeller oluşturulmuş, bu modellere uygulanan kuvvetler sayesinde burkulma için gerekli olan kritik yükler elde edilmiştir. Bu kritik yükler ayrıca teorik hesaplamalarla elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve yapılan çalışmanın doğruluğu ve hata payı incelenmiştir. Daha sonra yine üç boyutlu olarak cam elyaf ve karbon elyafların ANSYS programı yardımıyla analizleri yapılmış ve aynı şekilde teorik olarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Cam elyaf, karbon elyaf ve bor elyaf için serbest titreşim analizleri yapılmış, elde edilen serbest titreşim frekansları karşılaştırılmıştır. Elyafın tek başına incelenmesinin ardından, bor-elyaf bir matris içine konularak elyafın matrisle beraber bir yüke maruz kaldığı durumlardaki burkulması incelenmiştir. Bu analizde elyaf ve matrisin düğüm noktaları birbirleriyle birleştirilmiş ve matris yük uygulanan yüzeyi hariç tüm yüzeylerinden sabitlenmiş ve sadece alt yüzeyi sabitlenmiş olarak iki farklı çözüm yapılmıştır. Daha sonra matris içerisine dört adet bor elyaf konularak dörtlü elyaf-matris sistemi analizi yapılmıştır. Ardından matris yerine yay sistemi yerleştirilerek elyafın yaylar yardımıyla bir elyaf-matris sistemi gibi hareket edip etmediği araştırılmış ve sabitlenerek analiz yapılarak sonuçlar incelenmiştir.

ANALYTICAL ANALYSIS OF FIBER BUCKLING IN COMPOSITE MATERIALS

SUMMARY

This study is conducted on buckling of fibers in composite materials. After the similar literature research, buckling analysis of fibers, which are constrained at one end, are done with the help of ANSYS program. First, one dimensional and three dimensional models are created for boron fibers and the critical buckling loads are determined. These critical loads are also calculated theoretically and comparisons are made. Later on, three dimensional carbon fiber and glass fiber analyses are made with ANSYS program. Theoretical critical buckling loads are calculated similarly. Free vibration analyses for glass fiber, carbon fiber and boron fiber are done and compared. After analyzing fiber on its own, a boron fiber is put in a matrix and the critical loads are analyzed. In this analysis, two different solutions are made, firstly, all the surface areas except the one which the load is applied are constrained and secondly, only one area at the bottom is constrained. In another analysis, four boron fibers are put in a matrix and the solution is done with ANSYS program. Later, instead of using a matrix, springs are used in order to examine if the fiber-spring system acts like a fiber-matrix system and the results are compared.

1 GİRİŞ

Bir yandan gelişen teknolojinin beraberinde getirdiği teknik problemlere daha verimli çözümler bulma ihtiyacı, öte yandan teknik sistemlerde daha iyi performans düzeylerine erişme arzusu, son yıllarda malzeme bilimi üzerinde giderek yoğunlaşan çalışmalar yapılmasına yol açmıştır. Özellikle son 20 yıl içinde elyaf takviyeli malzemelerin başta havacılık endüstrisi olmak üzere pek çok endüstri dalında yaygın olarak kullanılmaya başlanması malzeme bilimi için son yıllarda kaydedilen en büyük ilerlemelerden biri olmuştur. Ülkemizde de giderek gelişme eğilimi gösteren havacılık endüstrisine paralel olarak elyaf takviyeli malzemeleri konu alan araştırmaya dönük çalışmaların yoğunluk kazanması yüksek teknolojiye dayalı bir endüstri yaratma yolunda önemli bir adımı oluşturmaktadır.

1.1 Önceki çalışmalar

Literatürde kompozit yapıların burkulması ve elyafların yerel burkulması ile ilgili bir çok çalışma vardır. Bunlardan kompozit yapıların burkulması ile ilgili olanlardan bazıları aşağıda verilmektedir. Malzeme özellikleri sıcaklığa bağlı bir kolonun burkulması Euler-Bernoulli teorisi çerçevesinde minimum potansiyel enerji prensibi vasıtasıyla incelenmiştir [1]. Çalışmada geliştirilen elemanlar kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar klasik sonlu elemanlar ve analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçların analitik sonuçlara klasik sonlu elemanlar ile elde edilen sonuçlar kadar güçlü bir şekilde yakınsadığı görülmüştür. Bu çalışma sonlu elemanlar yöntemi ile burkulma analizlerinin doğru bir şekilde yapılabileceğini göstermesi bakımından yol gösterici olmuştur. I-kesitli kompozit kirişlerin yerel burkulmasının incelendiği bir çalışmada burkulma nedeniyle hasar mekanizması analitik olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla uyumlu bulunmuştur [2]. Bu sayede, makalede önerilen metodun geçerliliği kanıtlanmıştır. Tek gözlü karbon nanotüp takviyeli nanokompozit kirişlerin eğilme ve eğilme sonucu ortaya çıkan yerel burkulmasının incelendiği bir çalışmada matrisin deformasyonu Airy-gerilme fonksiyonu kullanılarak incelenmiş ve matrisin kesit alanı değişiminin yerel burkulmaya etkileri

gözönüne alınmıştır [3]. Sonuç olarak daha kalın matris tabakalarında kirişin yerel olarak daha ufak eğilme açılarında ve daha yüksek yassılaşıma oranlarında burkulduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun matris çevresinde daha yüksek gerilmelere neden olduğu görülmüştür. Kompozit yapıların dizaynı ve yerel burkulması üzerine bir çalışmada dikdörtgen şeklindeki çeşitli sınır şartlarındaki kompozit plakların burkulması Ritz yöntemi kullanılarak incelenmiştir [4]. Ayrıca söz konusu kompozit plaklardan yapılmış kutu şekilli yapıların yerel burkulmaları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel ve sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmış ve yük bulunmayan sınırlardaki elastik kısıtlanmalı kompozit tabakaların yerel burkulmasının incelenmesi için önerilen metodun uygun olduğu anlaşılmıştır. Üstüste konmuş elyaf takviyeli plastiklerin burkulması ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak ve deneysel olarak incelenmiştir [5]. Burkulma yükü tabakaların kalınlığı ve sınır şartları gibi farklı değerlere bağlı olduğundan, bu değerler ANSYS sonlu elemanlar programında yerleştirilerek belirli sayıdaki üstüste konmuş tabakaların analizi yapılmıştır. Sonuç olarak her taraftan mesnetli kompozit tabakalarda optimal elyaf oryantasyonunun ± 45 derece olduğu görülmüştür. Ancak bu değer diğer sınır şartları için geçerli olmadığı bulunmuştur. Yapılan çalışma basma yükü etkisi altında hasarda burkulmanın önemine işaret etmiştir. Elastisite katsayısı yüksek olan karbon elyaflarla güçlendirilmiş epoksilerin basma yükü altındaki davranışının incelendiği bir çalışmada sadece basma (Celanese basma testi) ve sadece eğilme testleri uygulanmıştır [6]. Karbon elyaflar sert olmalarına rağmen basma performansları oldukça zayıftır ve boyutlandırma işlemi sırasında oluşabilecek riskleri engelleme için basma yükü altındaki davranışı mümkün olduğu kadar doğru ölçülmelidir. Bu nedenle iki değişik tipteki karbon elyafına uygulanan sadece basma testi ile birim şekil değiştirmeler elde edilmiş sadece eğilme testi ile de büyük yer değiştirmeler dikkate alınabilmiş ve bu test sayesinde her bir kesitteki yükler hesaplanabilmektedir. Kopmaya kadar olan basma yükündeki kaybı incelemek için elastik lineer olmayan bir model önerilmiştir. Sonuç olarak Celanese basma testinde gereğinden erken oluşan kopmalara rastlanmıştır. Eğilme testindeyse basma davranışı yüksek deplasmanlarda bile gözlemlenebilmiştir. Tek ve çok katmanlı kompozitlerin tek eksenli basma yükü altındaki burkulma ve burkulma sonrası davranışları deneysel olarak incelenmiş, ayrıca sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla lineer olmayan burkulma analizi yapılmıştır [7]. Tek ve çok katmanlı kompozitler arasındaki farklar burkulma bakımından tartışılmıştır. Lineer olmayan burkulma

analizi sonuçları deneysel sonuçlarla uyumlu bulunmuştur. Prizmatik kompozit kolonların burkulması istatistiksel yöntemlerle incelenmiştir [8]. Söz konusu çalışmada malzeme özellikleri rastgele seçilmiş ve sonuçta kritik yükün ortalama ve standart sapma değerleri elde edilmiştir. Ayrıca ince cidarlı I-kesitli kirişlerin hem perde hem de başlık kısımlarının burkulması incelenmiştir. Burkulma analizi Ritz metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli basma yükü altında incelenen yapının kritik burkulma yükleri hesaplanmıştır. I-kesitli kompozitlerin yerel burkulma ve burkulma sonrası davranışları Galerkin yöntemi kullanılarak çözülmüştür [9]. Elde edilen sonuçlar daha önceki çalışmalarla ve STAGS yazılımı ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışma katmanlı kompozitlerin burkulma sonrası davranışları için geçerli bir yöntem sunmaktadır. Başka bir çalışmada için boş elyaf takviyeli plastik elektrik direklerinin eğilme hasar modları deneysel ve teorik olarak incelenmiştir [10]. Direklerde E-camı kullanılmıştır. 12 adet eğilme testi uygulanmıştır. Rüzgar açısı ve katman sayısının değişimi göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca yerel burkulma incelenmiştir. Çalışma ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analitik sonuçlar çeşitli kalınlıklardaki numuneler için deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Elyafların yerel burkulması ile ilgili bazı çalışmalar ise şu şekilde sıralanabilir. Cam elyaf ile güçlendirilmiş geri dönüştürülebilir plastiklerin yerel burkulması analitik ve deneysel olarak araştırılmıştır [11]. Deneylerde E-camı elyaf takviyeli iki gözlü kutu kiriş yapının dört nokta eğilme testi yapılmıştır. Kolonun orta bölgesinde olan elyafların burkulduğu gözlemlenmiştir. Kritik basma gerilmesinin Rosen'in önerdiği analitik olarak elde edilen değerlere yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca elyaf burkulmasının matriste yanlamasına olduğu kadar boylamasına yönde de matris çatlaklarına neden olduğu görülmüştür. Başka bir çalışmada katmanlı kompozitlerin tek eksenli basma yükü altındaki burkulma davranışları analitik ve deneysel olarak incelenmiştir [12]. Katman ayrılma bölgelerinin uçlarında oluşan etkileri gözlemlemek için burkulma davranışlarını analiz eden bir yöntem önerilmiştir. Deneysel sonuçlar analitik sonuçlar ile karşılaştırıldığında önerilen yöntemin geçerliliği kanıtlanmıştır. Önerilen yöntem yerel ve genel burkulmada oluşan kuvvetleri, momenti ve enerjiyi hesaplamada etkili ve basit bir yol sağlamıştır. Katman uzunluğu ve konumunun burkulma davranışlarına etkileri incelenmiştir.

Analitik sonuçların benzer ve daha ayrıntılı çalışmalarda kullanılabileceği gösterilmiştir. Çeşitli reçine malzemeleri kullanılarak hazırlanan cam elyaf takviyeli kompozitler basma, çekme, eğilme, darbe, sertlik ve sıcaklık bakımından deneysel olarak incelenmiş ve matris elastisite katsayısının sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür [13]. Çok eksenli yüklemeye maruz kalan elyaf takviyeli kompozitlerin basma yükü altında hasarı konulu bir çalışmada elyaf takviyeli bir katmanın çok eksenli gerilme altındaki burkulması incelenmiştir [14]. İki açılı dirsekli bir bantın denge denklemleri yazılmış ve analiz gerçekleştirilmiştir. Çok eksenel gerilme durumları incelenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki tek eksenli bir yüklemeye sıfırdan farklı bir dirsek bantı açısı minimum yüklemeye limitini oluşturmaktadır. Elyaf takviyeli bir kompozitin burkulmasında elyaf anizotropisinin etkilerinin incelendiği bir çalışmada bir matris içine çaprazlama olarak gömülmüş izotropik elastik elyafların yer aldığı modelin denklemleri çıkarılmıştır [15]. Çözümde elyaf-matris ara yüzeyinin etkileri gözönüne alınmıştır. İzotropik ve anizotropik elyaf için elde edilen sayısal sonuçlarla metodun uygulanabilirliği gösterilmiştir. Elyaf anizotropisinin kritik burkulma yükünü düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu düşüşün en önemli sebebinin elyaf kayma modülünden kaynaklandığı bulunmuştur. Deneysel bir çalışmada farklı çelik plakalardan ve epoksi yapışkandan meydana gelen kompozit yapılar basma yükü altında test edilmiştir [16]. Burkulmanın meydana gelme aşaması video ile kaydedilmiştir. Mühendislik uygulamalarında kullanılan uzun elyafların plastik burkulmasının teorik sonuçları incelenmiştir. Başka bir makalede uzun elyaflı kompozitlerin plastik burkulmaya bağlı basma hasarı modellenmiştir [17]. Elyaf kusurları ve matrisin lineer olmayan fiziksel özellikleri ve yapısal parametrelerin etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Bu sayısal yöntem sayesinde çok az hesaplamayla tek eksenli davranışların hasarı maksimum yükler hesaplanarak tahmin edilmiş ve elde edilen sonuçlar yöntemin doğruluğunu kanıtlamıştır. Karbon elyaf takviyeli tabakalardaki elyaf burkulmasının basma yükü altındaki hasarının incelendiği bir çalışmada elyafların dirsekli bir bant yaratarak iki noktadan kırıldığı görülmüştür [18]. Ardından elyaf arasındaki matris hasara uğrayıncaya kadar elyafların döndüğü ve böylelikle tabakanın taşıma kapasitesini kaybettiği görülmüştür. Söz konusu çalışmada tek yönlü karbon takviyeli plastik tabakaların basma yükü altında elyaf burkulmaları incelenmiştir. Çalışma sonucunda elyafların çekme yükü altında hasara uğramadığı, ancak basma yükü altında içbükey olarak burkulduğu gözlemlenmiştir.

Dokunmuş elyaf takviyeli kompozitlerin yüksek mukavemet gerektiren yapılardaki kullanımı oldukça yaygınlaşmakta ve bu amaçla yapılan bir çalışmada dokumada kullanılan kumaş içindeki tek eksenel yükleme altındaki elyafların basma yükü altındaki davranışları analitik ve deneysel olarak incelenmiştir [19]. Basma yükü sırasında elyafların uzunlamasına, yanal ve katmana dik yönlerdeki yük dağılımı incelenmiş ve kompozitin bu yükler altındaki davranışına bakılmıştır. Farklı dokuma kumaşlarında kullanılan E cam-epoksi ve T-300 karbon-epoksi kompozitlerinde meydana gelen basma yükü ve elastisite katsayıları hesaplanmıştır. Dokuma geometrisinin basma yükü altındaki kompozitlerdeki davranışı nasıl etkilediği incelenmiştir. Epoksi matrisi içindeki elyaf yerleştirilmesinde meydana gelen kusurları görebilmek için başka bir çalışmada elyafın bükülmesi mikroskop yardımıyla ve videoya kaydedilerek incelenmiştir [20]. Çalışmalar göstermiştir ki elyaf hasarı epoksi matrisin sıcaklığı yükseltildiği sırada meydana gelmektedir. Çalışmanın amacı elyaf matris sisteminin bu davranışının nedenlerini incelemek ve oluşumlarını açıklayabilmektir. Öncelikle elastik bir burkulma modeli önerilmiştir. Malzemelerin mekanik karakteristikleri gözönüne alınarak sonlu elemanlar hesaplamaları kullanılmış ve elyafa basma yükü uygulanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen değerler, gözlemlene sırasında epoksi matrisinin davranışları sonucunda ortaya çıkan değerlerle karşılaştırılmış ve sonuçlar nitelik bakımından uyumlu bulunmuştur. Başka bir çalışmada elyaf takviyeli metal matris kompozitlerin akma ve çökme davranışları analitik ve sayısal olarak incelenmiştir [21]. Sayısal inceleme için ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Akmanın matrisin akma gerilmesine ulaştığı zaman olduğu elde edilmiştir. Çökmenin metal matris kompozitin artık daha yüksek bir yükü kaldıramayacağı zaman olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma göstermiştir ki metal matris kompozitlerin çökmesine neden olan kritik yük akmaya neden olan yükten daha yüksektir. Çökme davranışının incelenebilmesi için analitik bir mekanik model oluşturulmuştur. Analitik model sonucunda elde edilen sonuçların sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Karbon elyaf kompozitlerin basma yükü altındaki davranışlarının ve elyaf matris arası gerilme transferlerinin incelendiği bir makalede ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır [22]. İlk olarak elde edilen sonuçlar önce daha önceki çalışmalar ve deneyler ile karşılaştırılarak model doğrulanmıştır. Ardından elyaf matris ara yüzeyindeki gerilmeleri incelemek için sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki hasar çoğunlukla

elyaf eksenine dik yönde oluşmaktadır ve bu durum basma yükü altında test edilen kompozitlerin hasar modlarında gözlemlenen davranışı açıklamaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlerde basma testlerinin gözönüne alındığı bir makalede, genel olarak kullanılan iki basma testi yöntemi, ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak elde edilen hesaplamalarla karşılaştırılmıştır [23]. Söz konusu basma testi yöntemleri geliştirilerek yeni bir test yöntemi sunulmuştur. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin tek yönlü basma yükü altındaki davranışlarının anlaşılması için yapılan başka bir çalışmada geliştirilen pek çok modelin sonucunda elyaf-matris sistemlerinde meydana gelen kırılmalarla ilgili daha kesin sonuçlar elde edebilmek için çoklu elyaf modelleri geliştirilmiştir [24]. Söz konusu çalışmada deneysel ve sayısal teknikler kullanılmıştır. Sayısal çalışmada ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar göstermektedir ki yüksek modüllü karbon elyaf/epoksi kompozitlerde basma yükü sırasında meydana gelen hasar çoğunlukla karbon elyafların kendilerinin basmaya karşı vermiş olduğu tepkilerden meydana gelmektedir. Başka bir çalışmada katmanlı ve elyaf takviyeli kompozitlerin elastik burkulması analitik olarak incelenmiştir [25]. Elyaf matris içine gömülü olarak analiz edilmiştir. Kayma burkulması konsantrasyonu hafifletilmiş sonlu dalga boylarına sahip kompozitlerin burkulması ve konsantrasyonu hafifletilmemiş sonsuz dalga boylarına sahip kompozitlerin burkulması olarak iki durumda incelendiğinden, bu iki durum arasındaki geçişin meydana geldiği durum için bir model oluşturulmuştur. Burkulma gerilmeleri için sayısal sonuçlar sunulmuştur ve literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

1.2. Kompozit Malzemelerin Havacılıkta Uygulamaları

Başta Grafit/Epoksi(Gr/Ep) olmak üzere elyaf takviyeli plastik malzemeler günümüz havacılık endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahip olmuşlardır. Bu malzemeler, ilk kez 1940'lı yıllarda cam elyaf takviyeli malzemelerin radomlarda kullanılmasıyla havacılık endüstrisine girmiştir[26]. Uçak yapılarında yaygın kullanım potansiyeli, 1960'larda İngiltere'de karbon elyafın, Amerika'da ise bor elyafın hemen hemen aynı zamanlarda ortaya çıkmasıyla belirginleşmeye başlamıştır. İleri kompozit malzemeler olarak adlandırılan, karbon ya da bor elyaf ile genellikle epoksinin birleşiminden meydana gelen bu malzemeler, hem dayanım hem de rijitlik yönünden klasik uçak malzemelerine göre belirgin bir üstünlüğü simgelemektedirler. Başlangıçta Bor/Epoksi(B/Ep) daha hızla ve özellikle amerikada gelişmiştir. 1970'e

kadar yapılan bazı deneysel amaçlı B/Ep parçalar uçaklara adapte edilmiş, böylece kazanılan tecrübeler saha sonra dizayn edilen yüksek performanslı Amerikan uçaklarında kullanılmıştır. Öte yandan, Gr/Ep İngiltere’de çok daha yavaş bir ilerleme sergilemiştir. Bununla beraber, 1970’lerin ortasında Amerika’da malzeme fiyatlarına bağlı olarak B/Ep’den Gr/Ep’ye yönelme başlamıştır. İleri kompozit malzemeler bugün yalnızca askeri uçaklarda değil, helikopterde ve biraz gecikmeli bir şekilde olsa da ticari uçaklarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Tipik uçak yapıları, tabakaların üstüste yerleştirilmesi ve elyaf sarma gibi başlıca iki yöntemle üretilmektedir. Kanat kaplamaları, yatay ve dikey kuyruk kaplamaları, kontrol kapakları, gövde bölümleri tabakaların üstüste yerleştirilmesiyle oluşturulurken, basınç kapları, radomlar, transmisyon milleri, helikopter rotor palleri elyaf sarma yöntemi ile imal edilmektedir.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada kompozit malzemelerdeki elyafların burkulması incelenmiştir. Elyaf burkulması kompozit basma yükü altındaki hasarını oldukça önemli bir şekilde etkilemektedir. Bu nedenle elyaf burkulmasının incelenmesi için yöntem geliştirilmesi oldukça önemlidir. Öncelikle bu konuda yapılan önceki çalışmalar araştırılmıştır. Önceki çalışmalar elyaf burkulmasının analitik, deneysel ve sayısal olarak incelendiğini göstermiştir. Bu çalışmalar arasında sayısal çalışmalar oldukça fazla bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada ise ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak matris içinde elyaf burkulmasının incelenmesi için bir yöntem önerilmiştir. Bu amaçla tek taraftan sabitlenmiş elyaflara uygulanan yükün sonucunda oluşan burkulma analizi ANSYS programı yardımıyla araştırılmıştır. Öncelikle bor-elyaf için 3 boyutlu ve tek boyutlu modeller oluşturulmuş, bu modellere uygulanan kuvvetler sayesinde burkulma için gerekli olan kritik yükler elde edilmiştir. Bu kritik yükler ayrıca teorik hesaplamalarla elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve yapılan çalışmanın doğruluğu ve hata payı incelenmiştir. Daha sonra yine üç boyutlu olarak cam elyaf ve karbon elyafların ANSYS programı yardımıyla analizleri yapılmış ve aynı şekilde teorik olarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Cam elyaf, karbon elyaf ve bor elyaf için serbest titreşim analizleri yapılmış, elde edilen frekanslar karşılaştırılmıştır. Elyafın tek başına incelenmesinin ardından, bor-elyaf bir matris içine konularak elyafın matrisle beraber bir yüke maruz kaldığı durumlardaki burkulması incelenmiştir. Bu analizde elyaf ve matrisin

düğüm noktaları birbirleriyle birleştirilmiş ve matris yük uygulanan yüzeyi hariç tüm yüzeylerinden sabitlenmiş ve sadece alt yüzeyi sabitlenmiş olarak iki farklı çözüm yapılmıştır. Daha sonra matris içerisine dört adet bor elyaf konularak dörtlü elyaf-matris sistemi analizi yapılmıştır. Ardından matris yerine yay sistemi yerleştirilerek elyafın yaylar yardımıyla bir elyaf-matris sistemi gibi hareket edip etmediği gözlemlenmiştir ve sabitlenerek analiz yapılarak sonuçlar incelenmiştir.

2 ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler, bir veya birden çok değişik fiziksel ya da kimyasal özelliklere sahip malzemenin birleştirilmesinden meydana gelen malzemelerdir. Kompozit malzemeler istenilen amaçlar ve direngenlik, mukavemet, ağırlık, yüksek sıcaklık performansı, korozyon direnci, sertlik ve ısı iletkenliği gibi mekanik özelliklerin istenilen yere getirilmesi için üretilirler. İç yapıları incelendiğinde heterojen bir dağılım meydana getirdiklerinden, bileşenler seçilip ayırt edilebilir. Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içinde çözünmezler, kimyasal olarak inert davranış sergilerler[26]. Kompozit malzemeler yapıları, uygulama alanları ve pekiştiricilerinin şekli ve geometrisine göre çeşitli kavramlarla sınıflandırılabilirler. En genel anlamda, kompozit malzemeler 3 sınıfa ayrılabilir:

- Doğal kompozit malzemeler:ağaç, canlı kemiği, bambu, kas ve diğer dokular
- Mikrokompozit malzemeler: metalik alaşımlar, pekiştirilmiş termoplastikler
- Makrokompozit malzemeler: galvanize edilmiş çelik, pekiştirilmiş beton sütunlar, helikopter palleri

Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu elyaf şeklinde üretildiklerinden mukavemet ve rijitlikleri kütle halindeyken gösterdikleri değerlerin çok üstünde değerler alabilir. Elyafların bu özellikleri çapları 2-25 mm kadar olabilen küçük çaplı elyaflarda daha belirgin olarak görülebilir[26]. Yüksek performanslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi, yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip elyafların üretimleri ile gerçekleşmiştir.

Günümüzde mekanik organik veya seramik esaslı elyaflardan yapılan kompozitler düşük performanslı ev eşyaları ve spor malzemelerinden yüksek performanslı roket motorları ve uçak kanatlarına kadar değişen çeşitli uygulamalara sahiptirler. Elyaf yapısı içerisinde bir uçtan diğer uca kadar uzanan sürekli elyaflar, uzun elyafların

çeşitli boyutlarda kesilmesi ile elde edilen sürekli olmayan elyaf lar, çeşitli dokulama ve örgüler şeklinde kullanılmaya elverişlidirler.

Elyaf matris kompozitlerin yanı sıra elyaf-elyaf kombinasyonundan oluşan kompozitler de endüstride kullanılmaktadır. Buna örnek olarak ağır metallerin taşınımı için kullanılmakta olan konveyör kayışları gösterilebilir[27]. Elyaf-matris kompozitlerin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler elyafın şekli, uzunluğu, yönlenmesi, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf-matris arayüzeyleridir.

Günümüzde kullanılan sürekli ve sürekli olmayan elyaf lar genellikle dairesel kesitlidirler. Ancak, dikdörtgen, hekzagonal, poligonal ve içi boş dairesel kesitli elyaf lar da kullanılabilir. Dikdörtgen kesitli elyaf lar da birim hacimde kullanılmış olan elyaf oranı yüksek tutulabilmektedir. Hekzagonal şeklindeki elyaf ların mukavemeti oldukça yüksek olmasına rağmen üretimde zorluklarla karşılaşmaktadır[27].

Elyaf lar uzunlukları açısından yaklaşıldığına mekanik özelliklerin yanısıra kompozit üretiminde işlem seçimini de etkilediği görülmektedir. Sürekli elyaf larla çalışmanın kolaylık avantajı bulunsa da tasarım açısından sürekli olmayan elyaf larla göre çok daha sınırlı seçenekler sunmaktadır. Sürekli elyaf ların en genel uygulamalarından biri filaman sarma uygulamasıdır.

Elyaf yönlenmesi kompozit özelliklerini etkileyen faktörler arasında büyük öneme sahip olan faktörlerden biridir. Kompozit malzemenin mukavemet ve rijitliğinin alabileceği en büyük ve en küçük değerlerle ara değerler pekiştiricilerin yönlenmesine bağlıdır. Elyaf lar da bir, iki ya da üç boyutlu yönlendirme yapılması mümkündür. Bir boyutlu yönlendirme sonucunda kompozitin dayanımı ve mukavemeti elyaf eksen yönünde maksimum değere ulaşır. İki boyutlu pekiştirmede mukavemet her yönde farklı bir değerdedir. Üç boyutlu durumda ise kompozit malzeme büyük ölçüde izotropik özellik gösterir. Herhangi bir yöndeki mekanik özellikler bu yönde kullanılan elyaf ların hacim yüzdesi ile orantı vermektedir[28].

Elyaf kompozitlerin mekaniksel özelliklerini etkileyen faktörlerden biri de ara yüzey bağıdır. Kompozit malzemeye dışarıdan uygulanan gerilmeler arayüzeydeki kayma gerilmeleri vasıtasıyla matristen elyaf lar a iletilir. Bu bağların zayıf olması durumunda yükleme koşullarında elyaf lar matristen ayrılır ve gerilim büyük ölçüde düşük mukavemetli olan matrise etkir. Matrisle elyaf lar arasındaki fiziksel ya da

kimyasal uygunluğun mevcut olmaması veya uygun şekil vermek tekniğinin seçilmemesi durumunda arayüzey özellikleri zayıflar. Bu nedenle kompozit malzeme tasarımlarında elyafların uygun bir malzeme ile kaplanması işlemi öngörülmektedir. Bu sayede arayüzey arabileşiklerinin oluşumu engellenebilmektedir. Cam elyaf takviyeli elyaflarda elyaflar üzerine uygulanan kaplamalar, bor elyafları ile pekiştirilmiş alüminyum kompozitlerinde bor elyafların SiC ile kaplanması bu tür uygulamalar örnek olarak gösterilebilir[26].

Elyaf kompozitlerde matris malzemenin esas fonksiyonları elyafları birarada tutmak, yüzeylerini korumak, kompozit malzemenin şekillendirilmesini sağlamak ve en önemlisi gerilmeleri yüksek mukavemet değerlerine sahip elyaflara iletmektir.

Elyaf kompozitler bileşenlerin organik ya da inorganik esaslı olmasına göre gruplandırılabilirler [27].

- Organik elyaf-organik matris(grafit epoksi)
- İnorganik elyaf-organik matris(camelyaf-polyester,epoksi, PVC)
- İnorganik elyaf-inorganik matris(Si,Al₂O₃)
- Organik elyaf-inorganik matris(grafit-seramik,cam seramik)

Matris malzeme içinde yer alan elyaf takviyeler kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastik modüle ve sertliğe sahip olan elyaflar kimyasal korozyona da dirençlidir. Elyafların ince çaplı üretilmeleri ile büyük kütsel yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Üstün mikroyapısal özellikleri, tane boyutlarının küçük oluşu ve küçük çapta üretilmeleri, boy/çap oranı arttıkça matris malzeme tarafından elyaflara iletilen yük miktarının artması ve elastik modülünün çok yüksek olması elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olmalarının nedenleridir. Sürekli elyaf tabakalı kompozitler, diğer kompozit tiplerine göre uçak yapılarında daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Elyaf takviyeli kompozitlerin özellikleri, elyaf takviyelerinin yönlenmelerine göre değişken bir dağılım gösterir. Elyaf doğrultusunda çok yüksek bir mukavemet değerine sahipken, elyaflara dik doğrultuda çok az veya hiç mukavemet göstermezler. Uçak yapılarında kullanılmak üzere geliştirilmiş olan ileri kompozit malzemelerde elyaf oranı %70 değerine ulaşmaktadır [26]. Bu yapıları oluşturmak

için yarımamul(prepreg) tabakalar kullanılmaktadır. Elyafli kompozit yapısı ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda düşük mukavemet elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyafların uzunluk/çap oranları arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir. Mukavemette önemli olan bir diğer unsur ise elyaf matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise, elyafla temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağı olumsuz yönde etkilemektedir.

Elyaf takviyeli malzemeler matris içerisine gömülü sürekli elyaflardan oluşmuşlardır. Bu tür malzemelerin havacılık endüstrisinde kullanılmaya başlamasının esas nedeni önemli ölçüde ağırlık tasarrufuna imkan vermesidir. Bugünkü bilinen elyaf takviyeli malzemelerin kullanımı ile sağlanabilen ortalama ağırlık tasarrufu %225 dolaylarındadır [27]. Bunun yanı sıra elyaf takviyeli malzemeler, havacılık endüstrisinin alüminyum alaşımları gibi klasik malzemelerine kıyasla üstün dayanım/ağırlık ve rijitlik/ağırlık oranları sağlamaktadırlar.

Havacılık endüstrisinde başlıca cam, bor, karbon, aramid elyaf lar ile epoksi ile reçinenin birleştirilmesinden oluşturulan cam/epoksi, bor/epoksi, karbon/epoksi, aramid/epoksi malzemeler kullanılmaktadır. Elyaf ları birarada tutacak, yükü elyaf lar a iletecek ve elyaf ları çevre etkisinden koruyacak ideal bir matris malzemesi, başlangıçta düşük viskoziteli bir sıvı durumundayken daha sonra kolayca dayanıklı katı bir yapı oluşturabilmeli ve takviye malzemesi elyaf etrafında yeterli kemikleşmeyi sağlayabilmelidir. Yük esas itibariyle elyaf lar tarafından taşındığı için elyaf ların hasar anına dek gösterdiği uzama aynı zamanda kompozit yapının hasara uğrama kriteri olarak ortaya çıkar. Elyaf lar da görülebilecek kopma uzaması genellikle %1-1.5 civarında olup bu şek il değişimi seviyesinde çatlama göstermemesi matristen istenen bir diğer önemli özellik durumundadır [28]. Matrisin elyaf ı ıslatma kabiliyeti ve böylece ortaya çıkacak elyaf/matris bağı dayanımı, üzerinde durulması gereken bir başka önemli özelliktir. Elyaf/matris bağı dayanımı

çok yüksekse çatlak ilerlemesi elyaf ve matrise dik yönde hiç bi sapma göstermeksizin oluşur ve gevrek bir malzeme gibi davranan tüm yapı düzgün kırılma yüzeyi parçalar halinde hasara uğrar. Elyaf/matris bağı dayanımı çok düşükse, elyaflar elyaf demetiymişcesine etkirler. Bu durumda zayıf bir kompozit yapı söz konusudur. Ara bağ dayanımı değerlerinde, elyafa ve matrise dik yönde ilerleyen çatlak yön değiştirerek elyaf/matris arayüzeyi boyunca ilerlemeye başlayabilir. Böyle bir durum önemli ölçüde enerji absorbsiyonuna imkan verir. Tok bir malzeme gibi davranan tüm yapı, kırılmış elyaf parçacıklarının görünür durumda olduğu kaba görünüşlü kırılma yüzeyi gösteren parçalar halinde hasara uğrar. Kullanım yer ve durumlarına göre, elyaflar arasında iyi bir yük iletimi sağlayan fakat kırılma tokluğu gösteren yüksek bağ dayanımlı sistemler ile elyaflar arasında daha az verimli bir yük iletimi sağlayan fakat daha büyük kırılma tokluğu gösteren düşük bağ dayanımlı sistemler arasında bir optimizasyona gidilmesi gerekir. Yön ve büyüklük bakımından yük durumunun tam olarak belirlenemediği yerlerde kullanılmak üzere üretilen kompozit yapılarda genellikle daha yumuşak matris malzemelerine ihtiyaç duyulurken. Yön ve büyüklük bakımından yük durumunun tam olarak belli olduğu yerler için üretilen kompozit yapılarda yüksek modüllü matris kullanımı açığa çıkar. Yük durumunun bir çok halde iyi bir yaklaşıklıkla belirlenebildiği uçak yapılar için geliştirilen ileri kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanıldığı görülmektedir.

2.2 Elyaf Türleri

2.2.1 Cam Elyaf

İleri kompozit malzemelerde kullanılan başlıca dört elyaf türünden ilki cam elyafıdır. Cam elyaf üretiminde değişik türlerde cam kullanılabilir [26]. Yanmaması, 371C'ye kadar dayanımının yaklaşık olarak %50'sini, 538C'ye kadar ise %25'ini koruması, mükemmel nem dayanımı, güçlü alkaliler ve hidroflorik asit dışında kalan kimyasal maddelere karşı üstün dayanım göstermesi, diğer elyaf türlerinden daha ucuz olması camı iyi bir elyaf malzemesi yapan özelliklerdendir. Cam elyaflar ıslak bir ortamda şişme, uzama, dağılıp parçalanma veya başka tür bir kimyasal değişiklik göstermezler. Elyaf üretiminde kullanılan esas cam tipi, özellikle elektrik endüstrisi için geliştirilmiş olan E-camı'dır. E-camı, silika(SiO_2), alumina(Al_2O_3), borik asit(H_3BO_3) ve kalsiyum karbonat(CaCO_3)'ın bir karışımıdır. Düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yatkınlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mukavemeti

oldukça yüksektir. Suyu karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle E-camı kullanılır. Bir diğer cam tipi silika, alumina ve magnezyum oksit (MgO) esaslı S-camıdır. Daha pahalı olmasına karşın E-camından dayanım bakımından %33, elastiklik modülü bakımından da yaklaşık olarak %20 daha üstündür. Üstün dayanım/ağırlık oranı yüksek sıcaklıklarda dayanımını koruyabilme özelliği ve yüksek yorulma dayanımı gibi nedenlerle S-camı hemen hemen bütünüyle, mekanik özelliklerin ön plana çıktığı yüksek performans uçak yapılarında kullanılmaktadır. Yüksek çekme mukavemetine sahiptirler, birim ağırlık başına mukavemeti çeliğinkinden yüksektir. ısı dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar. Bu özellikleri katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirilebilir. Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler. Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam elyafli kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Elektrik iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyafli kompozitlerin kullanılmasına imkan tanırırlar. Tablo 2.1’de cam elyaf tiplerinin özellikleri görülmektedir [28].

Tablo 2.1: Cam elyaf tiplerinin özellikleri

Bileşen(%)	E-cam	C-cam	S-Cam
SiO ₂	52.4	64.4	64.4
Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	14.4	4.1	25.0
CaO	17.2	13.4	-
MgO	4.6	3.3	10.3
Na ₂ O+K ₂ O	0.8	9.6	0.3
B ₂ O ₃	10.6	4.7	-
BaO	-	0.9	-
ρ (Mg m ⁻³)	2.60	2.49	2.48
K (W m ⁻¹ K ⁻¹)	13	13	13
α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	4.9	7.2	5.6
σ^* (Gpa)	3.45	3.30	4.60
E (Gpa)	76.0	69.0	85.5
T _{max} (°C)	550	600	650

2.2.2. Bor Elyaf

İleri kompozit malzemelerde kullanılan ikinci elyaf türü bor elyafıdır. Bor elyaf, bortriklorür ve hidrojenenden oluşan bir atmosfer içerisinde geçen elektrik akımı ile ısıtılmış ince tungsten tel üzerine borun çökeltilmesi yoluyla elde edilir. Bor elyaf, pahalı olması yanında kalın bir çapa sahip olduğundan karmaşık şekilli parça üretimine uygunluk göstermemektedir. Bununla beraber yüksek dayanımları nedeniyle özel bazı uygulamalarda hala önemli bir yere sahiptir. Çekme mukavemetleri 2758MPa ile 3447 MPa'dır. Elastik modülü ise 400GPa'dır. Bu değer S camının elastik modülünden beş kat fazladır. Bor elyafların erime sıcaklıkları 2040C civarındadır. Maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle son yıllarda yerlerini karbon elyaflara bırakmışlardır. Bor elyafların dayanımları Tablo 2.2'de gösterilmiştir [28].

Tablo 2.2: Bor elyaflarının dayanımları

Çap (µm)	İşlem	Dayanım (GPa)
142	Üretildiği gibi	3.8
406	Üretildiği gibi	2.1
382	Kimyasal cilalama	4.6
382	Isıl işlem ve cilalama	5.7

2.2.3 Karbon Elyaf

İleri kompozit malzemelerde kullanılan üçüncü elyaf türü karbon elyafıdır. Karbon elyaf, poliakrilonitril(PAN) gibi yüksek karbon içeren bir ön üründen elde edilir. Isıl ve mekanik işlemleri kapsayan bir süreç sonunda karbon dışındaki elementler uzaklaştırılmakta ve güçlü karbon-karbon bağları üstüste getirilerek karbon elyaf elde edilmektedir. İşlem sıcaklığının elyafın özellikleri üzerinde önemli etkisi vardır. Düşük sıcaklıkta elde edilen elyaf daha yüksek dayanıma sahipken daha yüksek sıcaklıklarda elde edilen elyafın elastiklik modülü daha yüksektir. Yüksek modüllü karbon elyafın maliyeti daha fazladır.karbon elyafların en büyük özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra yüksek mukavemet ve tokluk değeridir. Karbon elyaflar nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Karbon elyaflar çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Karbon elyaf bugün için havacılık endüstrisinde en yaygın biçimde kullanılan elyaf durumuna gelmiştir. Elyafların malzeme özellikleri Tablo 2.3'te gösterilmiştir[29].

Tablo 2.3: Çeşitli elyafların malzeme özellikleri

ELYAF	YOĞUNLUK ρ (Mg m ⁻³)	ELASTİSİTE KATSAYISI E (Gpa)	POISSON ORANI ν	ÇEKME GERİLMESİ σ (Gpa)
SiC	3	400	0,2	2,4
Bor	2,6	400	0,2	4
HM karbon	1,95	eksenel 380 radyal 12	0,2	2,4
HS Karbon	1,75	eksenel 230 radyal 20	0,2	3,4
E-cam	2,56	76	0,22	2
Nicalon	2,6	76	0,2	2
Saffil	3,4	300	0,26	2
Selüloz	1	80	0,3	3

Çeşitli elyafların boyutları, imalat yöntemleri ve örnekleri tablo 2.4'te gösterilmiştir[28].

Tablo 2.4: Çeşitli elyafların boyutları, imalat yöntemleri ve örnekleri

Şekil	Boyut (μ m)		İmalat yöntemi	Örnekler
	D	L		
Tek filamanlı (büyük çaplı tek elyaf)	100-150	∞	Çekirdek elyaf üzerinde CVD	SiC(SCS-6TM)
				Boron
Çok filamanlı (örgü başına 14000 elyafa kadar)	7-30	∞	Vulkanize sündürme, ısıt çözüm (yakma), eritme ve eğirme	Karbon (HS&HM)
				Cam
				Nikel TM
				Kevlar TM 49
				FPTM alüminum
Kısa elyaflar (battaniye, bant, yün, vs. içine bütünleştirilmiş filamanlar)	1-10	50-5000	Bulamaçın veya eriyiğin eğirilmesi, ısıt işlem	SaffilTM
				Kaowool
				FiberfraxTM
İnce kısa teller	0.1-1	5-100	Buhar reaksiyonu	SiC
				Al ₂ O ₃
Parçacık (gevşek toz)	5-20	5-20	Çelik yapımı yan ürünü, arıtılmış cevher, eriyik-pelte, vs.	SiC
				Al ₂ O ₃
				B ₄ C
				TiB ₂

2.3. Matris Malzemeleri

Kompozit yapılarda matrisin 3 temel fonksiyonu vardır. Bunlar, elyafları birarada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir ya da birkaç elyaf tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm elyaflara eşit olarak dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gerektirir. Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre daha zayıf ve esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasaramında dikkat edilmesi gereken bir husustur. Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arasındaki kuvvetleri çok yüksek ise elyaf ya da matriste oluşacak bir çatlağın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma düzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğrultuda bir çatlak elyaf/matris ara yüzüne dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler[26].

2.4 Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Elyaf takviyeli malzemelerin mekaniği biri mikromekanik diğeri makromekanik olarak iki bakış noktası gözönüne alınarak incelenebilir.

2.4.1. Mikromekanik Özellikler

Mikromekanik analizler, elyaf ile matrisin herbirinin özelliklerini ve birlikte etkileşimlerini gözönüne alarak kompozit yapı davranışını anlaşılabilir bir temele oturtmayı amaçlar. Ortalama kompozit özelliklerini belirlemek üzere kompozit malzemenin mikroyapısını simüle edecek yaklaşık modeller kullanılabilir. En basit modelde elyaflar, homojen, lineer elastik, izotrop ve düzgün yerleştirilmiş kabul edilir. Aynı zamanda matris de, homojen, lineer elastik ve izotrop olarak gözönüne alınmaktadır. Ayrıca elyaf/matris arayüzeyi boşluksuz ve kusursuz kabul

edilmektedir. Şüphesiz boşluklar, kusurlu elyaflar, üniform olmayan elyaf dağılımı gibi olumsuz faktörleri dikkate alan daha karmaşık modeller ortaya koymak da mümkündür. Mikromekanik yaklaşımların ana hedefi, kendisini oluşturan bileşenlerin özellikleri cinsinden kompozit yapı için elastik sabitleri belirlemek, böylece de kompozit yapı içinde oluşacak gerilme ve şekil değişimi alanlarının tarif edilmesine imkan vermektir[30]. Tek yönde sürekli elyafla takviyeli kompozit yapılar için başlıca elastik sabitler, takviye doğrultusunda elastiklik modülü, takviyeye dik doğrultuda elastiklik modülü, poisson oranı ve kayma modülüdür. Böyle bir yapı için söz konusu olan başlıca gerilme değerleri ise takviye doğrultusunda dayanım, takviyeye dik doğrultuda dayanım ve kayma gerilmesidir.

2.4.2 Makromekanik Özellikler

İleri kompozit yapılar, genellikle herbiri farklı doğrultularda takviye edilmiş çok sayıda tabakanın üst üste yerleştirilmesi veya elyafın farklı açılarda üst üste sarılması yöntemiyle oluşturulurlar [30]. Tabakaların yerleştirilmesi yöntemi havacılık endüstrisinde kullanılan en yaygın uygulama biçimidir. Makromekanik, tek yönde elyaf takviyeli tabakaya ait özelliklerden yola çıkarak malzemenin mekanik davranışını ortaya koymayı hedefler. Mühendislikte kullanılan malzemeler homojen ve izotropik gibi iki terimle açıklanır. Buradaki izotropik deyişi, malzeme içindeki bir noktada malzeme özelliklerinin yönlenmenin bir fonksiyonu olmadığını ifade eder. Yani, malzeme içindeki bir noktadan geçen bütün düzlemler malzeme özellikleri bakımından simetrik düzlemlerdir.

3 ANALİZLER

3.1 Bor Elyaf Analizi

3.1.1 Teorik Hesap

Daha sonra teorik hesaplamalar yapılmıştır. Burkulma analizinde tek taraftan sabitlenmiş bir kirişin kritik yük hesaplanması için denklem aşağıda görülmektedir.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (3.1)$$

Burada atalet momenti I, aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (3.2)$$

Buradan

$$P_{cr} = 0.2452 \text{ N}$$

Olarak bulunur.

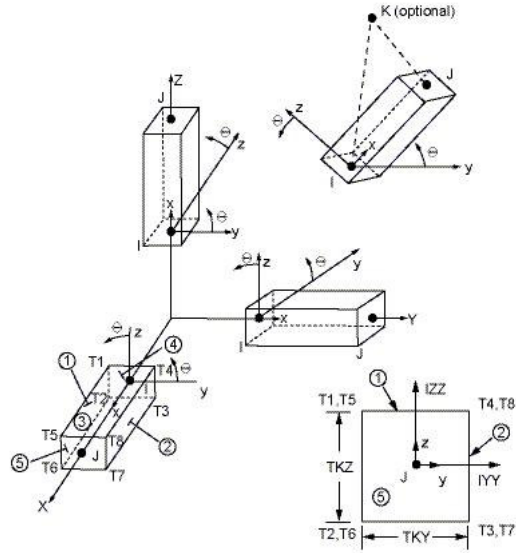
3.1.2. Bir boyutlu elemanlar kullanılarak bor elyaf analizi

Basma yüküne maruz kalmış olan elyafların davranışlarını incelemek için öncelikle en basit haliyle tek boyutlu olarak bir bor elyaf incelenmiştir. Bu incelemede ANSYS programı yardımıyla model oluşturulurken kesit alanı tanımlanarak elde edilen veriler malzeme özelliklerine girilerek 0.75e-4m çapında 0.01 m uzunluğunda bir model oluşturulmuştur. Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'te bulunan verilerden yararlanılarak oluşturulacak olan modelin yarıçapı ve uzunluğuyla belirlenen geometrisi, elastisite katsayısı, poisson oranı ve yoğunluğu programa işlenmiştir. Analiz sırasında kullanılan veriler aşağıdaki Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Bir boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan bor elyaf analizinde kullanılan veriler

KULLANILAN ELYAF	Bor
YARIÇAP(m)	0.075E-4
UZUNLUK(m)	0.01
KULLANILAN ELEMEN	BEAM4
ELEMEN SAYISI	50
POİSSON ORANI	0.2
ELASTİSİTE KATSAYISI(Pa)	4,E+11
YOĞUNLUK(Mg m ⁻³)	2,6

Programda analiz için seçilen eleman Beam4 elemanıdır. Beam4 gerilme, basma, burulma ve eğilme kapasitesine sahip tek eksenel bir elementtir. Altı serbestlik derecesine sahiptir: x,y, ve z yönlerinde hareket ve x,y,z, eksenlerinde rotasyon yapabilir. Beam4 elemanının şekli Şekil 3.1’de görülmektedir[31].



Şekil 3.1: BEAM4 eleman şekli

Beam4 elemanı, iki veya üç düğüm noktası, kesit alanı, iki atalet momenti (IZZ ve IYY), iki kalınlık (TKY ve TKZ), x eksen yönünde oryantasyon açısı ve malzeme özellikleriyle tanımlanır [31].

Beam4 elemanı kullanılarak ve gerçek değerlerin girilmesiyle modelin oluşturulmasının ardından analiz kısmına geçilmiştir. Bor elyaftan oluşan kiriş, tek bir taraftan sabitlenmiştir ve üstten elyafa 1N kuvvetinde yük uygulanmıştır. 1N kuvvetinde bir yüke maruz kalmış olan elyafa statik analiz yapılmış, ardından euler

burkulma analizi uygulanarak sonuçların genişletilmesi işlemiyle analiz tamamlanmıştır. Analiz sonucunda toplam 10 mod için çözüm elde edilmiştir. İlk mod için bulunan değerler, bor elyafın ilk olarak burkulmaya uğradığı sıradaki değerleri vermektedir. Bir kiriş için kritik burkulma yükü, uygulanan yükten bağımsız olarak belirlendiğinden, ANSYS program çıktısında görülen FACT sayısı, kritik yükün hesaplanmasını aşağıdaki şekilde sağlar:

$$\text{Uygulanan yük} \times \text{FACT} = \text{Kritik Yük}$$

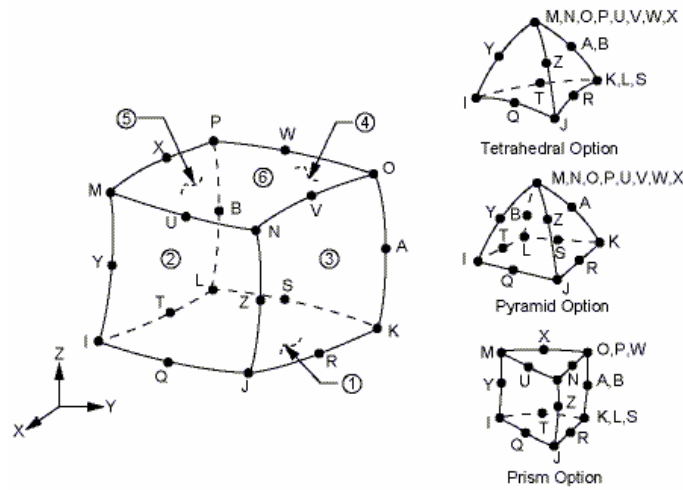
Analiz sırasında uygulanan yük 1N olduğu için, bor elyafın burkulma kritik yükü, sayısal olarak ANSYS program çıktısında bulunan FACT sayısına eşittir.

Bir boyutlu bor elyaf için euler burkulma analizinin tamamlanmasının ardından serbest titreşim analizi yapılmıştır. Malzemenin yoğunluğu girilerek yine 10 mod için çözüm yaratılmış ve frekans değerleri elde edilmiştir. Böylelikle bir boyutlu bor elyaf için analizler bitirilmiştir.

Bir boyutlu bor elyaf analizinin ardından üç boyutlu analize geçilmiştir.

3.1.3. Üç boyutlu elemanlar kullanılarak bor elyaf analizi

3 boyutlu bor elyaf analizi için ANSYS programında SOLID186 elemanı seçilerek 3 boyutlu bir bor elyaf modeli oluşturulmuştur. Bu elemanın özelliği 20 düğüm noktasından oluşması ve x, y, z yönlerinde üç serbestlik derecesinin bulunmasıdır. Şekil 3.2’de, kullanılan SOLID186 elemanı görülmektedir[31].



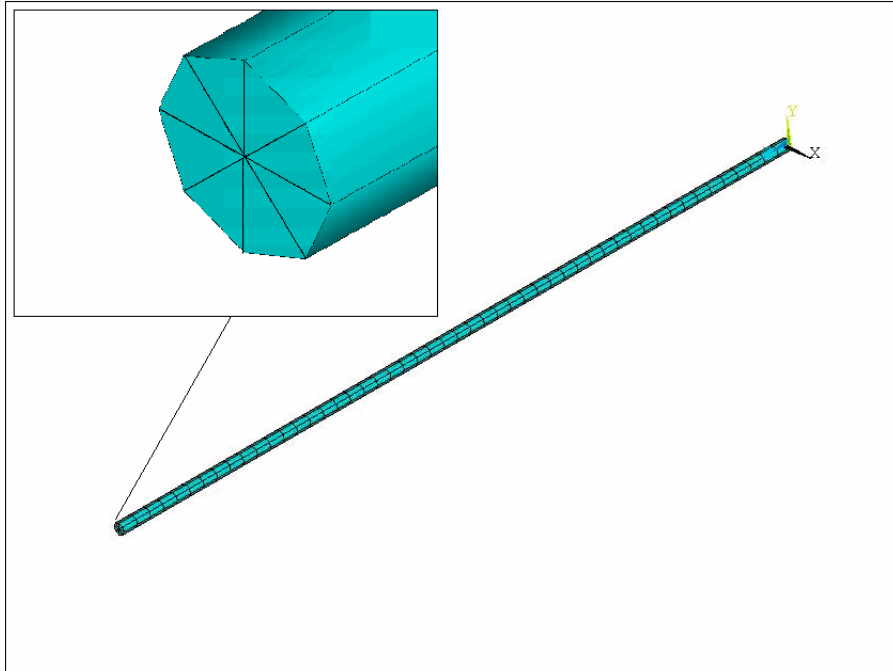
Şekil 3.2: SOLID186 eleman şekli

Aşağıda Tablo3.2’de verilen değerler, oluşturulan modelin boyutları ve malzeme özelliklerinin değerleridir.

Tablo 3.2: Üç boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan bor elyaf analizinde kullanılan veriler

KULLANILAN ELYAF	Bor
YARIÇAP(m)	0.075E-4
UZUNLUK(m)	0.01
KULLANILAN ELEMEN	SOLID186
ELEMEN SAYISI	400
POISSON ORANI	0.2
ELASTİSİTE KATSAYISI(Pa)	4,E+11
YOĞUNLUK(Mg m ⁻³)	2,6

Bu değerler ANSYS programında malzeme özelliklerine işlenmiştir. Üstten 8 pasta dilimine bölünmüş bölünmüş olan bu yapı, sweeping opsiyonuyla mesh atılarak boylamasına 50 parçaya bölünmüş ve böylelikle 400 elemandan oluşan bir elyaf modeli elde edilmiştir. Elde edilen model Şekil 3.3’teki gibidir.



Şekil 3.3: Üç boyutlu bor elyaf modeli

Elyafın, xy eksenindeki alt alanı tüm serbestlik derecelerinde sabitlenmiştir. Ardından analize geçilmiştir. Z ekseninde uygulanan toplamı 1N büyüklüğünde 9 kuvvet, pasta diliminin 8 noktasına ve en ortaya yerleştirilmiştir. Statik analiz

yapılmış ve çözümün ilk kısmı elde edilmiştir. Yapılan statik analizin sonucunda z ekseninde maksimum gerilme ve ortalama gerilme

$$\sigma_{\max} = -103 \times 10^6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{ort}} = -50 \times 10^6 \text{ MPa}$$

olarak bulunmuştur

Ardından Euler burkulma analizine geçilmiştir. Bu analizde yakınsama metodunu kullanan block lanczo seçeneği kullanılmıştır ve 10 döngülü bir yakınsama uygulanmıştır. Ardından burkulma sonucunda oluşan mod şekillerini görüntülemek amacıyla çözüm genişletilmiştir. Böylelikle çözüm analizi tamamlanmıştır. Elde edilen değerlerle birlikte, bor elyaf için üç boyutlu modellemede z yönündeki burkulma sonuçları elde edilmiş ve çözüm tamamlanmıştır. Ardından serbest titreşim analizi yapılmıştır ve elde edilen frekanslar bir boyutlu bor elyaf analizinin serbest titreşim frekanslarıyla karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu elyaf analizinin statik analiz, euler burkulması analizi ve sonuç genişletme analizlerinin yapılması birkaç dakika içinde mümkün olmuştur.

3.2 Cam Elyaf Analizi

3.2.1 Teorik Hesap

Teorik hesaplamalar aşağıdaki denklemden hesaplanmıştır

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (3.3)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (3.4)$$

ve kritik yük

$$P_{cr} = 0.000746 \text{ N}$$

Olarak bulunmuştur.

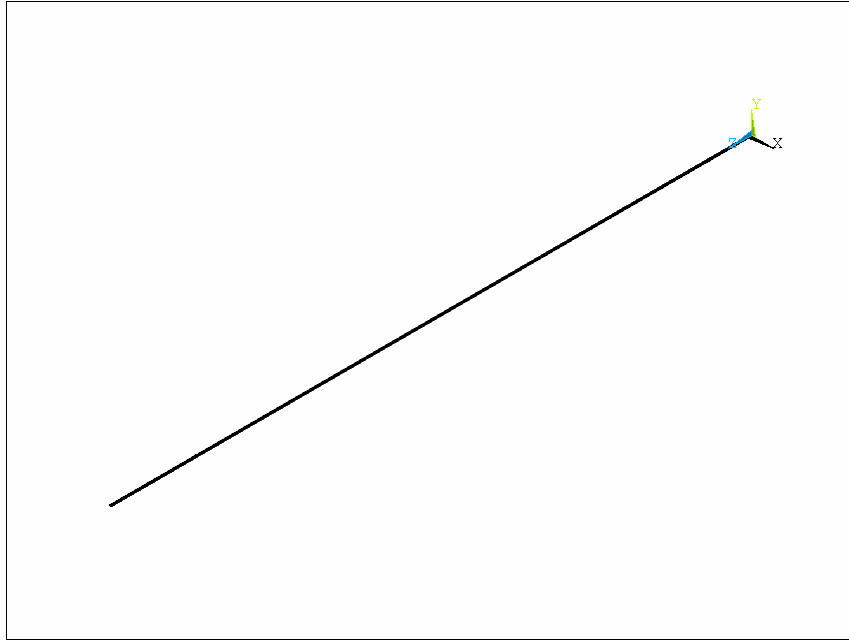
3.2.2. Üç boyutlu elemanlar kullanılarak cam elyaf analizi

Bor elyaf analizinin tamamlanmasının ardından, farklı elyaf tiplerinin davranışlarının gözlemlenebilmesi için cam elyaf kullanılarak analiz yapılmıştır. Cam elyafın malzeme özellikleri tablo1'den alınarak ANSYS programında yerleştirilmiştir.

Tablo 3.3: Üç boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan cam elyaf analizinde kullanılan veriler

KULLANILAN ELYAF	Cam
YARIÇAP(m)	0.015E-4
UZUNLUK(m)	0.01
KULLANILAN ELEMEN	SOLID186
ELEMEN SAYISI	400
POİSSON ORANI	0.22
ELASTİSİTE KATSAYISI(Pa)	7,60E+10
YOĞUNLUK(Mg m ⁻³)	2,56

Yapılan modelleme sonucunda elde edilen şekil, Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Cam elyaf modeli

Analizin geri kalanı üç boyutlu bor elyaf analizinin gerçekleştirildiği şekilde yapılmıştır. Yapılan statik analiz sonucunda z eksenindeki maksimum ve ortalama gerilmeler

$$\sigma_{\max} = -1440 \times 10^6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{ort}} = -1410 \times 10^6 \text{ Mpa}$$

olarak bulunmuştur.

3.3 Karbon Elyaf Analizi

3.3.1 Teorik Hesap

Bor elyaf analizinin tamamlanmasının ardından, farklı elyaf tiplerinin davranışlarının gözlemlenebilmesi için karbon elyaf kullanılarak analiz yapılmıştır.

Karbon elyaf için teorik hesaplamalar aşağıdaki formüller yardımıyla yapılmıştır.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (3.5)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (3.6)$$

Buradan kritik yük değeri

$$P_{cr} = 0.0003728 \text{ N}$$

olarak bulunmuştur.

3.3.2 Üç boyutlu elemanlar kullanılarak karbon elyaf analizi

Karbon elyafın malzeme özellikleri tablodan alınarak ANSYS programında yerleştirilmiştir.

Tablo 3.4: Üç boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan karbon elyaf analizinde kullanılan veriler

KULLANILAN ELYAF	Karbon
YARIÇAP(m)	0.015E-4
UZUNLUK(m)	0.01
KULLANILAN ELEMEN	SOLID186
ELEMEN SAYISI	400
POISSON ORANI	0.2
ELASTİSİTE KATSAYISI-eksenel(Pa)	3,80E+11
ELASTİSİTE KATSAYISI-radial(Pa)	12E+09
YOĞUNLUK(Mg m ⁻³)	1,75

Karbon elyafın eksenel ve radial yönde iki farklı elastisite katsayısına sahip olması nedeniyle ANSYS programında analiz yapılırken sonuçları karşılaştırabilmek amacıyla hem izotropik hem de ortotropik analiz yapılmıştır.

Öncelikle izotropik olarak analiz yapılmıştır. Yapılan statik analiz sonucunda z eksenindeki maksimum ve ortalama gerilmeler

$$\sigma_{\max} = -1440 \times 10^6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{ort}} = -1420 \times 10^6 \text{ Mpa}$$

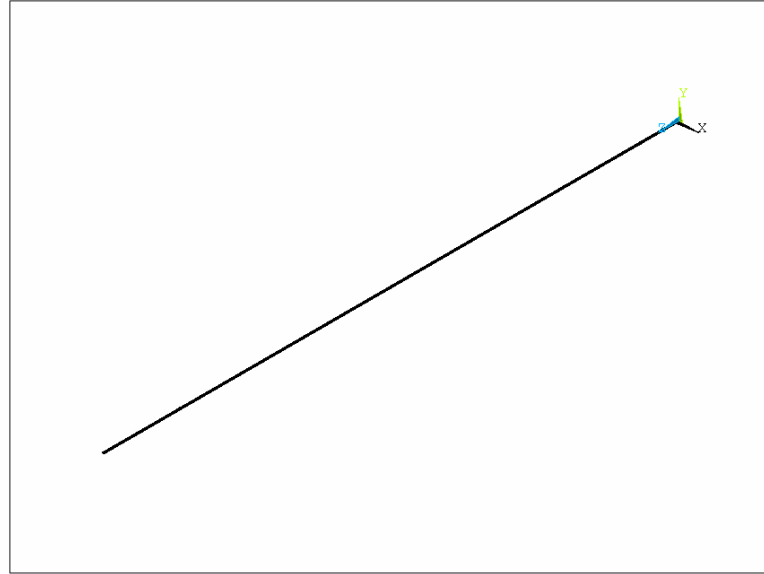
olarak bulunmuştur. Ardından analiz izotropik yerine ortotropik malzeme seçilerek gerçekleştirilmiştir. Burada x, y ve z için elastisite katsayılarının girilmesinin ardından kayma modülleri Gxy, Gxz ve Gyz için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$G_{xy} = \frac{E_x}{2(1+\nu)} = 158.33E+09 \quad (3.7)$$

$$G_{xy} = \frac{E_y}{2(1-\nu)} = 7.5E+09 \quad (3.8)$$

$$G_{xz} = \frac{E_z}{2(1-\nu)} = 7.5E+09 \quad (3.9)$$

Bu veriler yerleştirildikten sonra elde edilen model Şekil 3.5'teki gibidir.



Şekil 3.5: Karbon elyaf modeli

Analizin geri kalanı üç boyutlu bor elyaf analizinin gerçekleştirildiği şekilde yapılmıştır. Yapılan statik analiz sonucunda z eksenindeki maksimum ve ortalama gerilmeler

$$\sigma_{\max} = -1440 \times 10^6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{ort}} = -1410 \times 10^6 \text{ Mpa}$$

olarak bulunmuştur

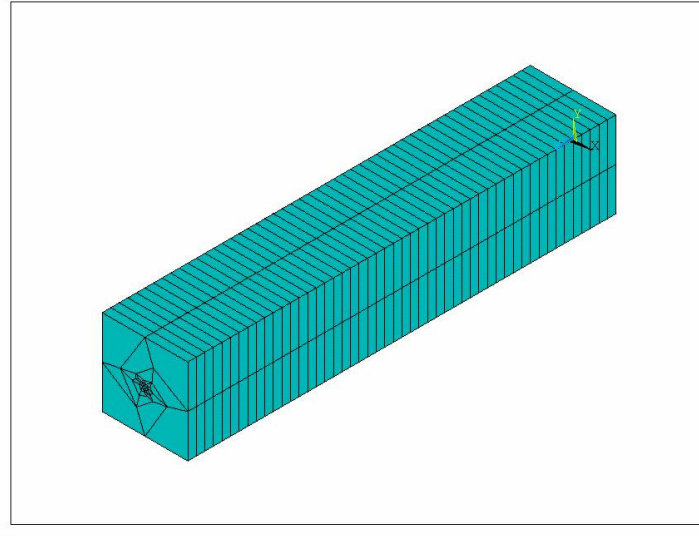
3.4 Elyaf Matris Analizi

Elyafların tek başına analizleri yapılarak davranışlarının gözlemlenmesinin ardından, elyaf, matris içine yerleştirilerek çözüm hazırlanmıştır. Bor elyaf, aşağıdaki özelliklere sahip bir matris içine yerleştirilmiştir. Bor elyaf-matris analizinde kullanılan veriler Tablo 3.5'te gösterilmiştir.

Tablo 3.5: Bor elyaf-matris analizinde kullanılan veriler

KULLANILAN ELYAF	Bor
YARIÇAP	0.075E-4
UZUNLUK	0.01
KULLANILAN ELEMAN	SOLID191
ELEMAN SAYISI	800
POISSON ORANI	0.2
ELASTİSİTE KATSAYISI	4,E+11
YOĞUNLUK	2,6
MATRİS ELASTİSİTE KATSAYISI	2,415E+09
MATRİS POISSON ORANI	0,35

Bir köşesi 0.001 m uzunluğunda olan bir kare, matrisin tabanını oluşturacak şekilde belirlenerek elyafı aynı uzunlukta matris SOLID186 elemanı kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen model Şekil 3.6'daki gibidir.



Şekil 3.6: Elyaf-matris sistemi modeli

Elyafın matris içindeki serbest davranışlarının kısıtlanması amacıyla elyafın yanal alanlarındaki düğüm noktaları, matrisin aynı koordinat sistemine denk gelen düğüm noktalarıyla birleştirilmiştir ve böylece matris-elyaf sistemi tek bir sistem olarak

hareket edecek şekilde tasarlanmıştır. İkinci tabakaya bor elyafın malzeme özellikleri girilerek analiz öncesi işlemler tamamlanmıştır. Matris elyaf sisteminin sadece alt yüzey alanı sabitlenmiştir. -Z yönünde toplam 1N kuvvetinde yük, üst alanda elyafın üzerine yerleştirilmiştir ve analiz gerçekleştirilmiştir. Statik analiz, euler burkulması ve sonuç genişletilmesi analizlerinin yapılması yaklaşık 20 dakikada mümkün olmuştur.

Bu şekilde yapılan analiz sırasında sadece alt yüzey alanı sabitlendiğinden elyaf-matris sistemi, sadece elyaf üzerine yük uygulanmış olmasına rağmen bir bütün gibi hareket ederek, tüm sistem burkulmaya uğramıştır. Bu durumun önüne geçebilmek ve sabit bir matris içerisindeki elyafın bireysel olarak burkulmasının gözlemlenebilmesi amacıyla analiz bu sefer matris-elyaf sisteminin yük eklenecek olan üst alanı hariç tüm çevre alanları sabitlenerek gerçekleştirilmiştir. Analizin geri kalan özellikleri bir önce yapılandırılmış olan sistemle aynı olup böylece sadece sınır değerleri değiştirilmiştir ve elyafın matris içerisindeki bireysel hareketi gözlemlenebilmiştir. Yapılan statik analiz sonucunda z eksenindeki maksimum ve ortalama gerilmeler

$$\sigma_{\max} = -1180 \times 10^6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{ort}} = -620 \times 10^6 \text{ Mpa}$$

olarak bulunmuştur.

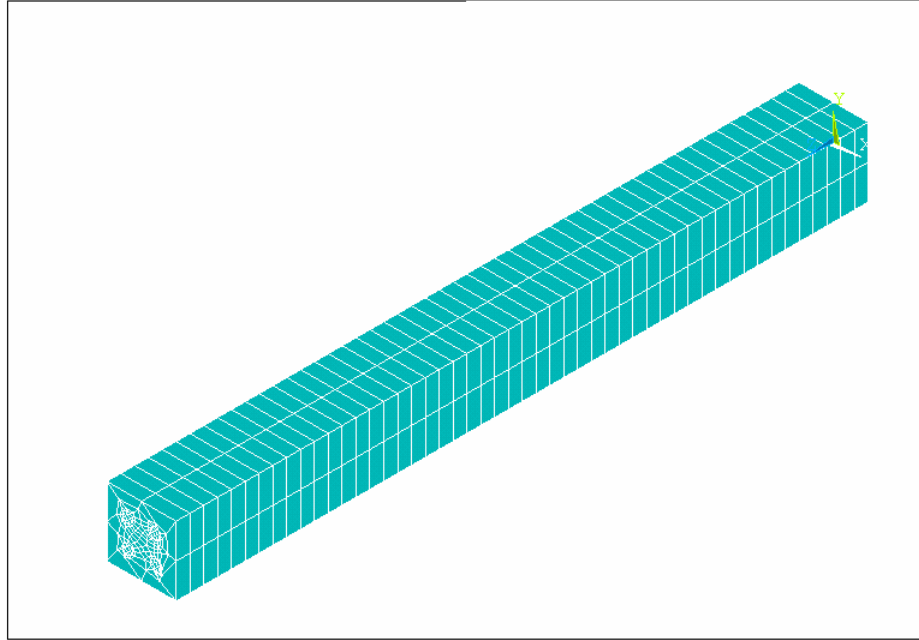
3.5 Matris içinde dörtlü elyaf analizi

Matris içine yerleştirilen tek bir elyafın ardından dört adet elyafı analiz yapılmıştır. 4 adet bor elyaf, matrisin kenar alanlarına eşit uzaklıkta yer alacak şekilde matris içine uygun biçimde yerleştirilerek her birinin yanal alanlarındaki düğüm noktaları, matris üzerinde yeralan düğüm noktalarıyla birleştirilmiştir. Aynı tek elyafı matris sisteminde olduğu gibi SOLID186 elemanı seçilerek bor elyaf ve matris için farklı değerler iki ayrı tabakada girilmiştir. Analiz sırasında kullanılan veriler Tablo 3.6'da gösterilmiştir.

Tablo 3.6: Dörtlü bor elyaf-matris analizinde kullanılan veriler

KULLANILAN ELYAF	Bor
YARIÇAP	0.075E-4
UZUNLUK	0.01
KULLANILAN ELEMEN	SOLID186
POİSSON ORANI	0.2
ELASTİSİTE KATSAYISI	4,E+11
YOĞUNLUK	2,6
MATRİS ELASTİSİTE KATSAYISI	2,415E+09
MATRİS POİSSON ORANI	0,35

Elde edilen model Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

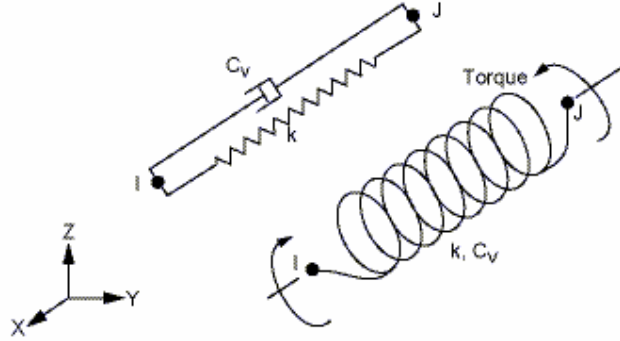


Şekil 3.7: Dörtlü elyaf matris sistemi modeli

Matrisin yük uygulanacak üst alanı hariç tüm alanları sabitlenmiştir ve böylelikle elyafların matris içindeki bireysel davranışları gözlemlenebilmiştir. Ardından analiz aşamasına geçilmiştir. Matrisin içine yerleştirilen tek bir elyafın analizi yaklaşık 20 dakika sürerken, matrise dört elyaf yerleştirildiği zaman analizin sonuçlanması 12 saati bulmuştur. Bu veriler 1.83Ghz işlemcili 128 MB ekran kartı ve 1GB RAM’e sahip bir bilgisayarda yapılan analiz sonucu elde edilen verilerdir.

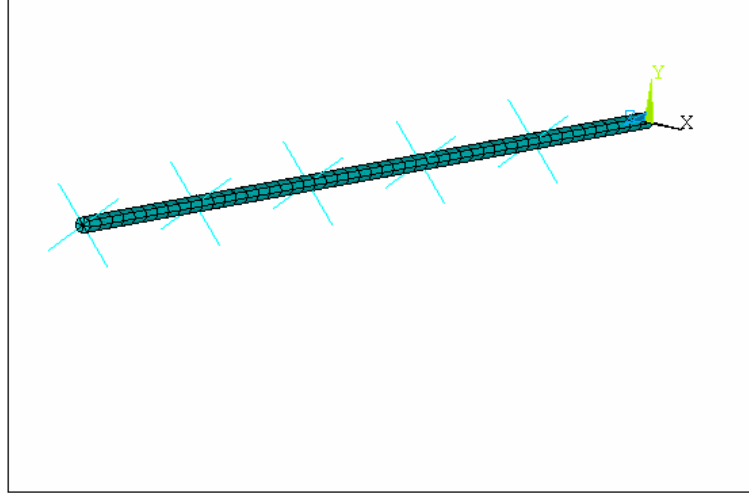
3.6. Yay-Elyaf Sistemi Analizi

Üç boyutlu bor elyaf-matris analizinde elyafın matris içindeki serbest davranışlarının kısıtlanması amacıyla elyafın yanal alanlarındaki düğüm noktaları, matrisin aynı koordinat sistemine denk gelen düğüm noktalarıyla birleştirilmiştir. Bu analizde birleştirilen düğüm noktalarının yerine yaylar konarak benzer bir sabitleme denemesi yapılmıştır. Burada amaç modelleme yapılırken matris yerine yay sistemi konarak elyafı yay ile sabitleyip matrisin yarattığı etkiyi sağlayıp sağlamadığını öğrenmektir. Üç boyutlu bor elyaf modellemesinin yapılmasının ardından elyafın uzunluğu boyunca her 0.002 m’de bir z ekseninde 90 derece açıyla her kesit alanında toplam 4 yay yaratılmıştır. Dolayısıyla 5 kesit alanında toplam 20 tane yay yerleştirilmiştir. ANSYS programında yaylar için COMBIN14 elemanı seçilmiştir. COMBIN14 elemanı bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde boylamasına ve analiz ve bükülme analizine izin verecek şekile tasarlanmış bir elemandır. Bu eleman sayesinde ANSYS programında yay ve sönümleyici elemanlar analize eklenebilir. Şekil 3.8’de COMBIN14 elemanının şekli görülmektedir[31].



Şekil 3.8: COMBIN14 eleman şekli

COMBIN14 elemanı x,y ve z yönlerinde toplam 3 serbestlik derecesine sahiptir. COMBIN14 elemanı ağırlıksız olarak tasarlanmış bir elemandır. Ağırlık verilmesi istendiğinde MASS21 elemanı kullanılarak ağırlık verilebilir. Bu analizde MASS21 elemanı kullanılmamıştır. Yaylar düğüm noktalarından 1.5e-4 m uzaklığına yerleştirilmiştir. Elde edilen model Şekil 3.9’daki gibidir.



Şekil 3.9: Yay-elyaf sistemi modeli

Yayların düğüm noktalarından uzakta yaratılan uçları sabitlenmiştir. ANSYS programında analiz sırasında kullanılan veriler Tablo 3.7'deki gibidir.

Tablo 3.7: bor elyaf-yay analizinde kullanılan veriler

KULLANILAN ELYAF	Bor
YARIÇAP	0.075E-4
UZUNLUK	0.01
KULLANILAN ELEMAN	SOLID186
KULLANILAN YAY ELEMANI	COMBIN14
POİSSON ORANI	0.2
ELASTİSİTE KATSAYISI	4,E+11
YOĞUNLUK	2,6
YAY SABİTİ	10

Yapılan statik analiz sonucunda z eksenindeki maksimum ve ortalama gerilmeler

$$\sigma_{\max} = -103 \times 10^6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{ort}} = -50 \times 10^6 \text{ MPa}$$

olarak bulunmuştur.

Ardından bir boyutlu elemanlar kullanılarak elde edilmiş bir bor elyaf için aynı şekilde statik analiz ve euler burkulma analizleri yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan yay sistemleri analizlerinde kullanılan yay sabiti hep 10 olarak alınmıştır. Elyaf matris sisteminde elde edilen kritik yük değerlerine yaklaşabilmek için yay katsayısı 1500 alınacak şekilde analiz tekrarlanmıştır.

4 SONUÇLAR

4.1 Bir boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan bor elyaf analizi sonuçları

Bir boyutlu bor elyaf analizinde elde edilen kritik yük değerleri tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Bir boyutlu eleman kullanılarak yapılan bor elyaf analizi kritik yük değerleri

MOD	Pcr(N)
1	0,24476
2	0,24476
3	2,2028
4	2,2028
5	6,1189
6	6,1189
7	11,993
8	11,993
9	19,825
10	19,825

Bir boyutlu bor elyaf analizinde elde edilen serbest titreşim frekans değerleri Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2: Bir boyutlu eleman kullanılarak yapılan bor elyaf analizi serbest titreşim frekans değerleri

MOD	Frekans
1	2601
2	2601
3	16297
4	16297
5	45618
6	45618
7	89353
8	89353
9	147620
10	147620

4.2 Üç boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan bor elyaf analizi sonuçları

Üç boyutlu bor elyaf analizinde elde edilen kritik yük değerleri tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Üç boyutlu eleman kullanılarak yapılan bor elyaf analizi kritik yük değerleri

MOD	Pcr(N)
1	0,24246
2	0,24246
3	2,1815
4	2,1815
5	6,0559
6	6,0559
7	11,859
8	11,859
9	19,579
10	19,579

Üç boyutlu bor elyaf analizinde elde edilen serbest titreşim frekans değerleri Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.4: Üç boyutlu eleman kullanılarak yapılan bor elyaf analizi serbest titreşim frekans değerleri

MOD	Frekans
1	2589,5
2	2589,5
3	16218
4	16218
5	45366
6	45366
7	88772
8	88772
9	146480
10	146480

4.3 Cam elyaf analizi sonuçları

Üç boyutlu cam elyaf analizinde elde edilen kritik yük değerleri Tablo 4.5'te gösterilmiştir.

Tablo 4.5: Üç boyutlu eleman kullanılarak yapılan cam elyaf analizi kritik yük değerleri

MOD	P _{cr} (N)
1	7,12E-05
2	7,58E-05
3	6,81E-04
4	6,81E-04
5	0,001922
6	0,001922
7	0,003855
8	0,003856
9	0,006569
10	0,006571

Üç boyutlu cam elyaf analizinde elde edilen serbest titreşim frekans değerleri Tablo 4.6’da gösterilmiştir.

Tablo 4.6: Üç boyutlu eleman kullanılarak yapılan cam elyaf analizi serbest titreşim frekans değerleri

MOD	Frekans
1	229,4
2	229,41
3	1444,8
4	1445
5	4080,6
6	4081,1
7	8099,7
8	8100,8
9	13617
10	13619

4.4 Karbon elyaf analizi sonuçları

Üç boyutlu karbon elyaf analizinde iki ayrı analiz yapılmıştır. İlk analizde ortotropik malzeme, ikinci analizde ise izotropik malzeme seçilerek analiz tekrarlanmış ve dolayısıyla farklı malzeme özelliklerinden kaynaklanan iki farklı analiz sonucu elde edilmiştir. Ortotropik malzeme seçilerek elde edilen kritik yük değerleri Tablo 4.7’de gösterilmiştir.

Tablo 4.7: Karbon elyaf analizinde ortotropik malzeme seçilerek elde edilen kritik yük değerleri

MOD	P _{cr} (N)
1	1,1828E-05
2	1,1836E-05
3	1,0538E-04
4	1,1035E-03
5	3,0215E-04
6	3,0259E-04
7	6,0620E-04
8	6,0671E-04
9	1,0318E-03
10	1,0329E-03

Üç boyutlu karbon elyaf analizinde ortotropik malzeme seçilerek elde edilen serbest titreşim frekans değerleri Tablo 4.8’de gösterilmiştir.

Tablo 4.8: Karbon elyaf analizinde ortotropik malzeme seçilerek elde edilen serbest titreşim frekans değerleri

MOD	Frekans
1	104,28
2	104,306
3	656,838
4	657,134
5	1855
6	1856
7	3680
8	3682
9	6182
10	6187

Üç boyutlu karbon elyaf analizinde izotropik malzeme seçilerek elde edilen kritik yük değerleri Tablo 4.9’da gösterilmiştir.

Tablo 4.9: Karbon elyaf analizinde izotropik malzeme seçilerek elde edilen kritik yük değerleri

MOD	P _{cr} (N)
1	3,7610E-04
2	3,7577E-04
3	3,4032E-03
4	3,4037E-03
5	9,5990E-03
6	9,6010E-03
7	1,9240E-02
8	1,9248E-02
9	3,2784E-02
10	3,2791E-02

Üç boyutlu karbon elyaf analizinde izotropik malzeme seçilerek elde edilen serbest titreşim frekans değerleri Tablo 4.10’da gösterilmiştir.

Tablo 4.10: Karbon elyaf analizinde izotropik malzeme seçilerek elde edilen serbest titreşim frekans değerleri

MOD	Frekans
1	587,43
2	587,47
3	3699,8
4	3700,2
5	10448
6	10449
7	20736
8	20738
9	34853
10	34857

4.5 Sabit olmayan elyaf-matris sistemi analizi sonuçları

Sabit olmayan elyaf-matris sistemi analizinde elde edilen kritik yük değerleri Tablo 4.11’de gösterilmiştir.

Tablo 4.11: Sabit olmayan elyaf-matris analizinde elde edilen kritik yük değerleri

MOD	Pcr(N)
1	0,32331
2	0,32333
3	2,754
4	2,7545
5	7,107
6	7,1101
7	13,121
8	13,128
9	20,842
10	20,851

4.6 Sabit elyaf matris sistemi analizi sonuçları

Sabit elyaf-matris sistemi analizinde elde edilen kritik yük değerleri Tablo 4.12’de gösterilmiştir.

Tablo 4.12: Sabit elyaf-matris analizinde elde edilen kritik yük değerleri

MOD	Pcr(N)
1	6,3393
2	6,4044
3	15,791
4	15,908
5	18,54
6	18,725
7	24,245
8	24,432
9	31,162
10	31,219

4.7 Dörtlü elyaf-matris sistemi analizi sonuçları

Dörtlü elyaf-matris analizinde elde edilen kritik yük değerleri Tablo 4.13'te gösterilmiştir.

Tablo 4.13: Dörtlü elyaf-matris analizinde elde edilen kritik yük değerleri

MOD	Pcr(N)
1	1030,9
2	1047,3
3	1075,2
4	1095,5
5	1140,9
6	1154,5
7	1165,5
8	1172,3
9	1532,9
10	1746,7

4.8 Yaylı elyaf analizi sonuçları

Yaylı elyaf analizinde elde edilen kritik yük değerleri Tablo 4.14'te gösterilmiştir.

Tablo 4.14: Yaylı elyaf analizinde elde edilen kritik yük değerleri

MOD	Pcr(N)
1	0,49747
2	0,49747
3	2,3763
4	2,3763
5	6,1029
6	6,1029
7	11,887
8	11,887
9	19,595
10	19,595

Yaylı elyaf analizinde elde edilen serbest titreşim frekans değerleri Tablo 4.15'te gösterilmiştir.

Tablo 4.15: Yaylı elyaf analizinde elde edilen serbest titreşim frekans değerleri

MOD	Frekans
1	3820,8
2	3820,8
3	16476
4	16476
5	45464
6	45464
7	88826
8	88826
9	146520
10	146520

Bir boyutlu elemanlar kullanılarak elde edilen kritik burkulma yükleri Tablo 4.16'da gösterilmiştir.

Tablo 4.16: Bir boyutlu elemanlar kullanılarak elde edilen kritik burkulma yükleri

MOD	Pcr(N)
1	0,50059
2	0,50059
3	2,4021
4	2,4021
5	6,1785
6	6,1785
7	12,047
8	12,047
9	19,882
10	19,882

Daha sonra yay katsayısı 1500 alınarak elde edilen kritik burkulma yükleri Tablo 4.17'de gösterilmiştir.

Tablo 4.17: Bir boyutlu elemanlar kullanılarak elde edilen kritik burkulma yükleri

MOD	Pcr(N)
1	6,3484
2	6,3484
3	10,45
4	10,45
5	13,325
6	13,325
7	20,279
8	20,279
9	29,404
10	29,404

4.9 Kritik gerilmeler

Sistemler için kritik gerilmeler, elde edilen kritik yük ile ortalama gerilme değeri çarpılarak elde edilebilir. Tablo 4.16’da sistemler için kritik gerilme değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.18: Sistemler için kritik gerilme değerleri

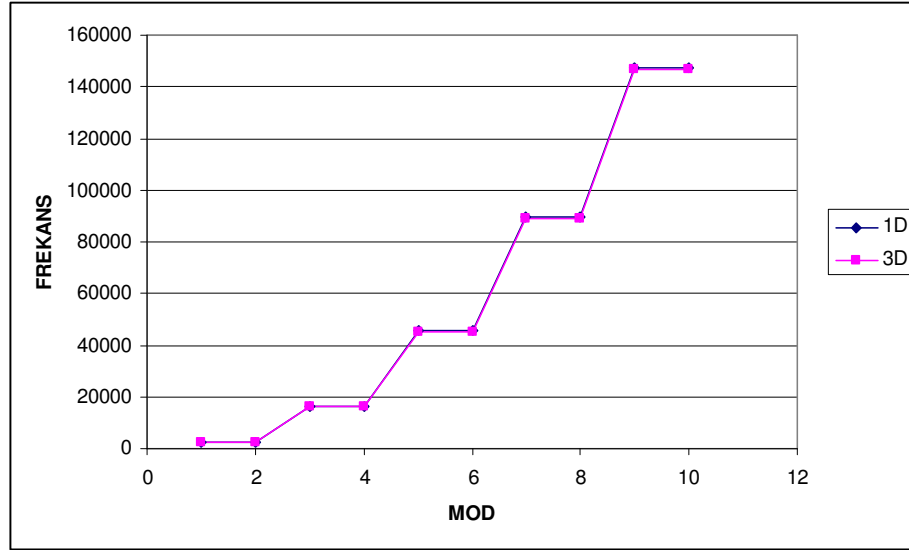
SİSTEM	σ_{kr} (Mpa)
BOR	12
CAM	1,05
KARBON(izotropik)	0,534
KARBON(ortotropik)	0,016677
ELYAF-MATRİS	393,055
ELYAF-YAY	24,87

Bir boyutlu bor elyaf analizinde ve üç boyutlu bor elyaf analizinde yapılan sonuçlar göstermektedir ki (Şekil 4.1) elde edilen kritik burkulma yükleri birbirine çok yakındır.



Şekil 4.1: Bir boyutlu ve üç boyutlu elyaf analizi kritik yük grafiği

Aynı şekilde serbest titreşim frekansları Şekil 4.2’de görüldüğü gibi örtüşmektedir.

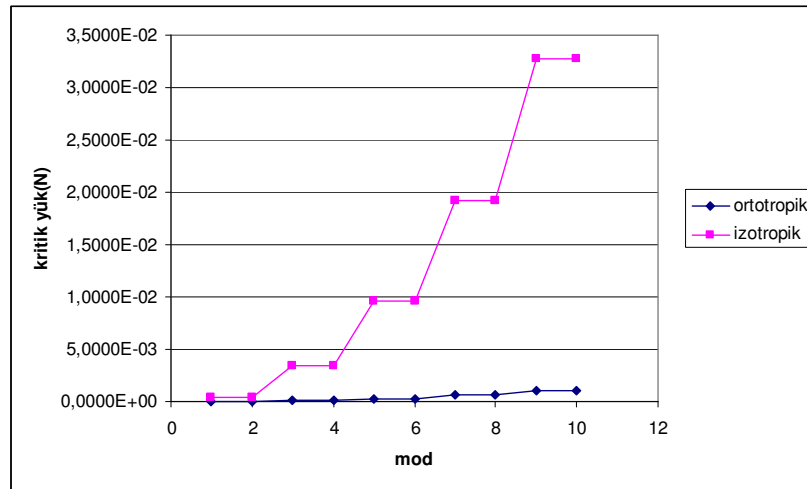


Şekil 4.2: Bir boyutlu ve üç boyutlu elyaf analizi serbest titreşim frekans grafiği

Teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen kritik yük değerinin, yapılan iki analiz içinde en çok bir boyutlu elyaf analizi sonucuna yakın olduğu gözlemlenmiştir.

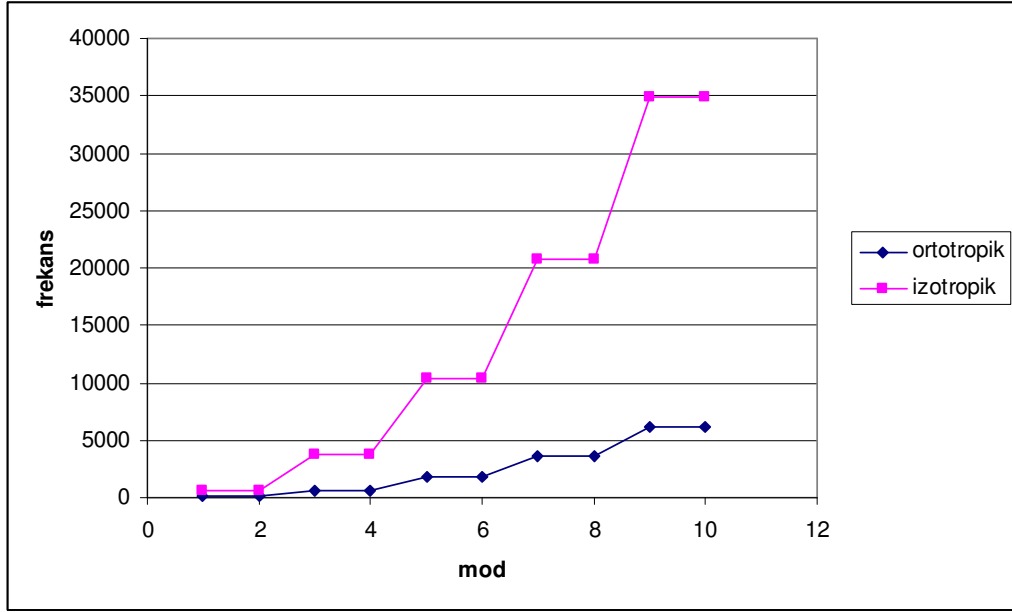
Cam elyaf için yapılan analiz sonucunda elde edilen değerler teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen değerlerle uyum göstermektedir.

Karbon elyaf için elde edilen değerlere bakıldığında görülmektedir ki ortotropik malzeme kullanılarak yapılan analiz ile elde edilen kritik burkulma yükleri, izotropik malzeme kullanılarak elde edilen kritik burkulma yüklerinden çok daha küçüktür. Bu karşılaştırma Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



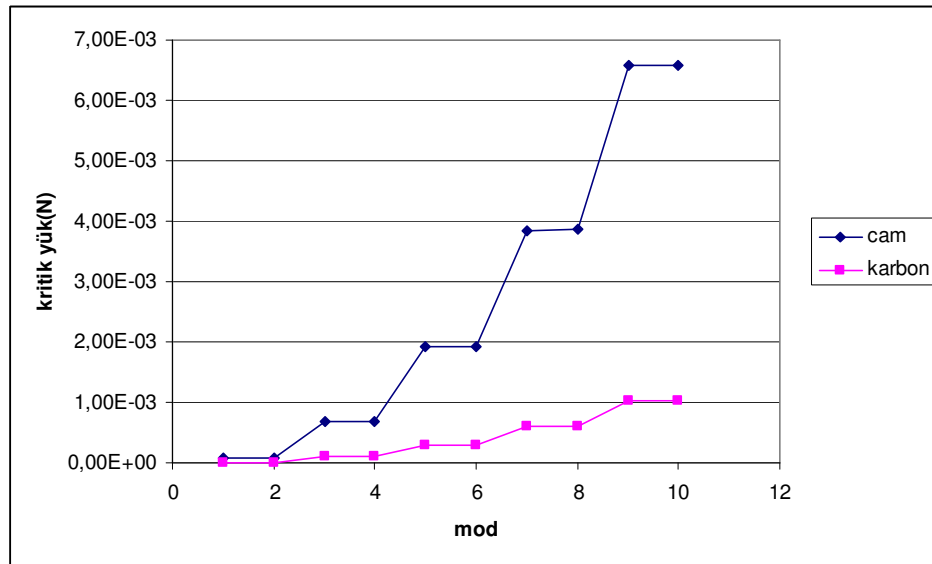
Şekil 4.3: İzotropik ve ortotropik karbon elyaf analizi kritik yük grafiği

Serbest titreşim frekansları karşılaştırıldığında Şekil 4.4'te görüldüğü gibi benzer bir durum gözükmemektedir.



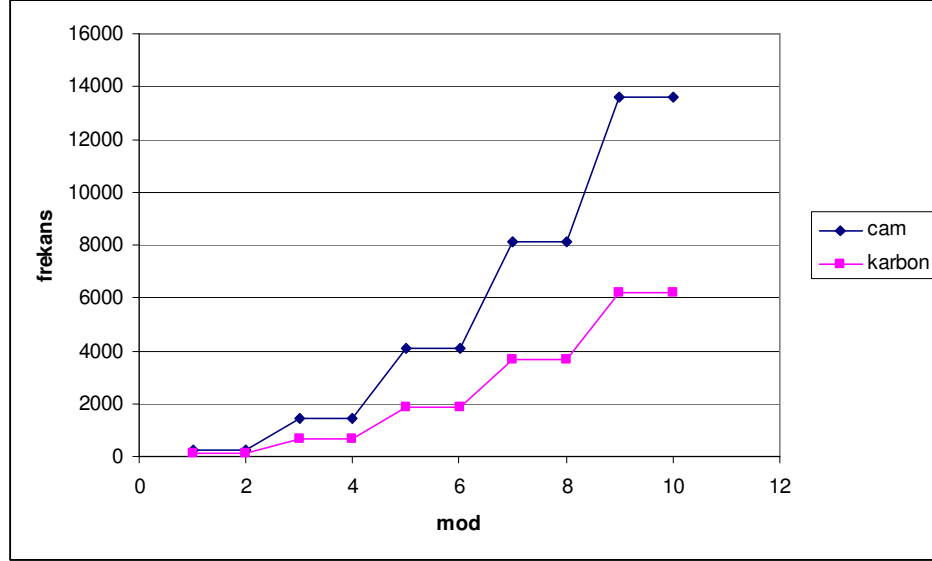
Şekil 4.4: İzotropik ve ortotropik karbon elyaf analizi serbest titreşim frekans grafiği

Aynı uzunlukta ve aynı yarıçapa sahip olarak modellenmiş bir cam elyafın kritik yükü karbon elyafın kritik yükünden yaklaşık 6 kat daha yüksektir.. Bu karşılaştırma Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5: Cam elyaf ve karbon elyaf analizi kritik yük grafiği

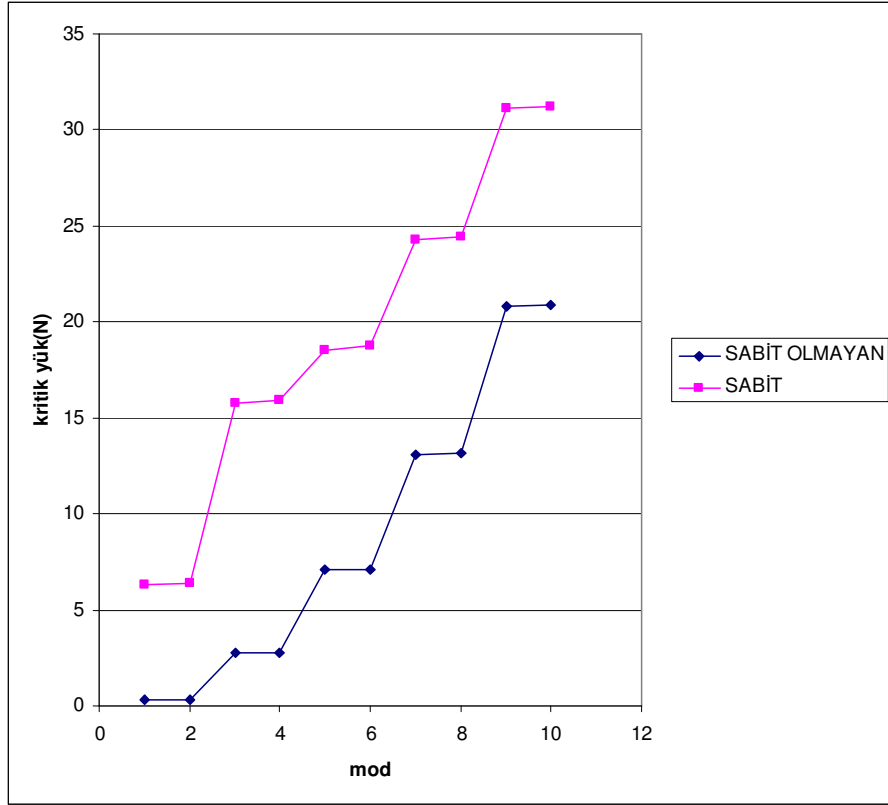
Aynı şekilde iki elyafın serbest titreşim frekansları karşılaştırıldığında cam elyafın serbest titreşim frekanslarının, karbon elyafın serbest titreşim frekanslarından daha büyük olduğu Şekil 4.6’da gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6: Cam elyaf ve karbon elyaf serbest titreşim analizi frekansları karşılaştırma grafiği

Dolayısıyla aynı uzunluktaki üç elyaf tipi karşılaştırıldığı zaman burkulmaya karşı en dayanıklı elyafın bor elyaf olduğu görülmüştür. Bunda, bor elyafın elastisite katsayısının büyüklüğü ve malzeme özelliklerinden kaynaklanan yarıçap oranının önemi gözlemlenebilmektedir. Ardından aynı uzunluktaki cam elyaf burkulmaya karşı direnç gösterirken karbon elyafın burkulma kritik yükü bu üç elyaf tipi arasındaki en küçük değerdir.

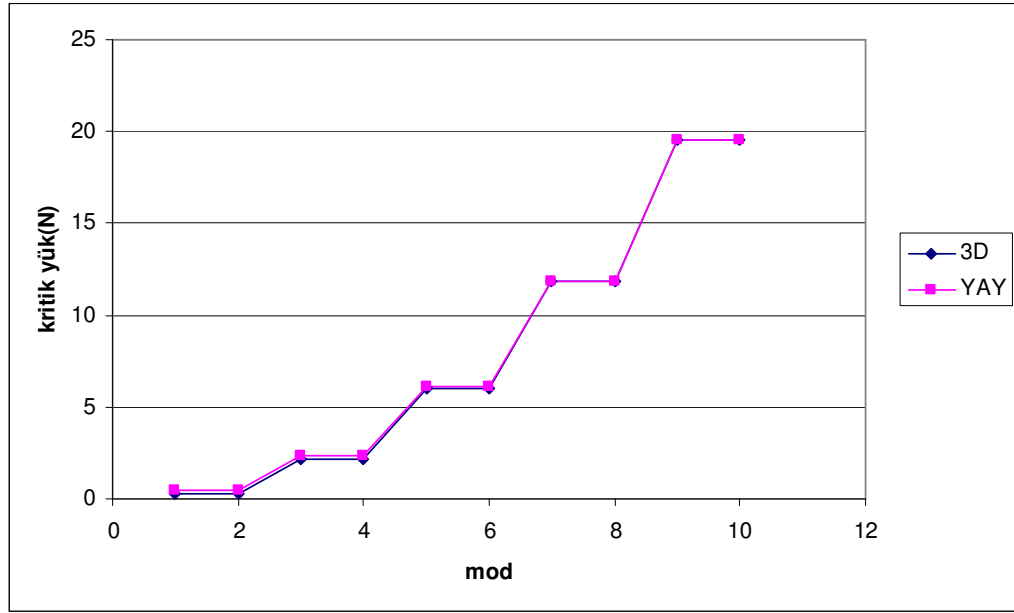
Elyaf ve matris birleştirildiği zaman elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığı zaman, matrisin yük konulan üst alanı hariç tüm alanları sabitlenerek yapılan analizde elde edilen değer, alanlardan sadece alt yüzey sabitlendiği zaman elde edilen kritik yükün yaklaşık 19.6 katı olduğu Şekil 5.7’de gözlemlenmiştir. Yani matris sabitlendiği zaman burkulmaya uğraması çok daha zor olmuştur. Ancak bu oran mod sayısı yükseldikçe azalmıştır ve son modlar karşılaştırıldığında oranın 1.49 gibi ilk modda elde edilen değerden oldukça küçük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7: Sabit ve sabit olmayan elyaf-matris analizleri kritik yük grafiği

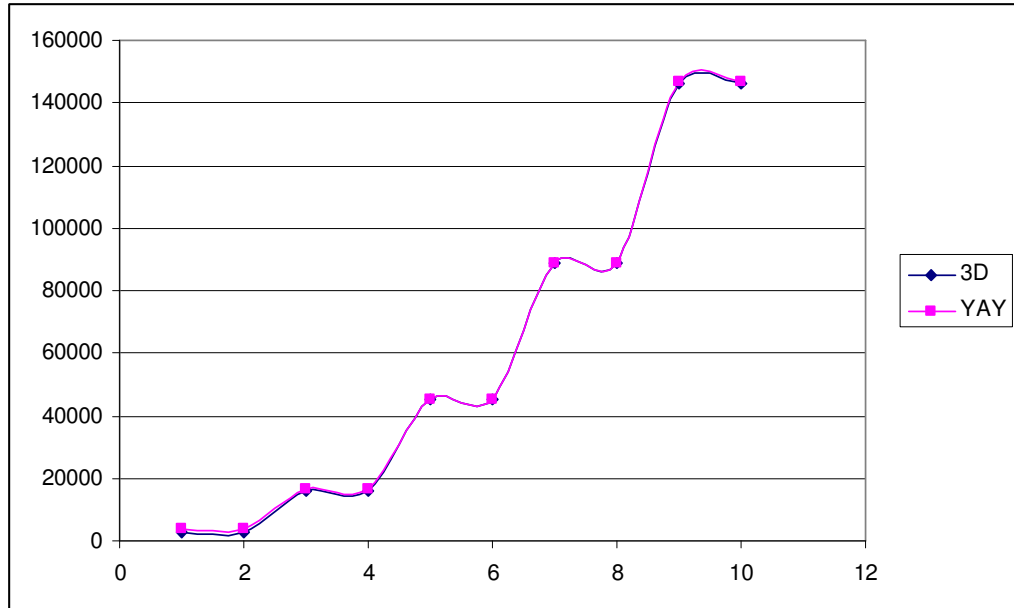
Matris içine yerleştirilen dört adet bor elyaftan oluşan modelin analizinde elde edilen sonuçlar, matris içinde tek bir elyaf yerleştirilmesiyle elde edilen sonuçlardan oldukça büyük çıkmıştır. Dörtlü elyaf sisteminde elde edilen sonuç, tek elyaf sisteminde elde edilen sonucun yaklaşık 162 katı olarak bulunmuştur. Bu değerin de mod sayıları yükseldikçe azaldığı gözlemlenmiştir ve son modda bu oran 56 katı olarak hesaplanmıştır.

20 adet yay kullanılarak yapılan analiz sonucunda elde edilen kritik yük değeri, üç boyutlu bor elyaf analizinde elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında görülmüştür ki yaylı sistemin ilk iki moddaki kritik yük değeri üç boyutlu bor elyaf sisteminin analizi sonucunda elde edilen değerlerin yaklaşık iki katıdır. Ancak diğer sekiz modda bu oranlar yine de üç boyutlu elyaf değerlerinden yüksek olmasına rağmen çok yaklaşmıştır. Şekil 4.8’de bu karşılaştırma görülebilir.



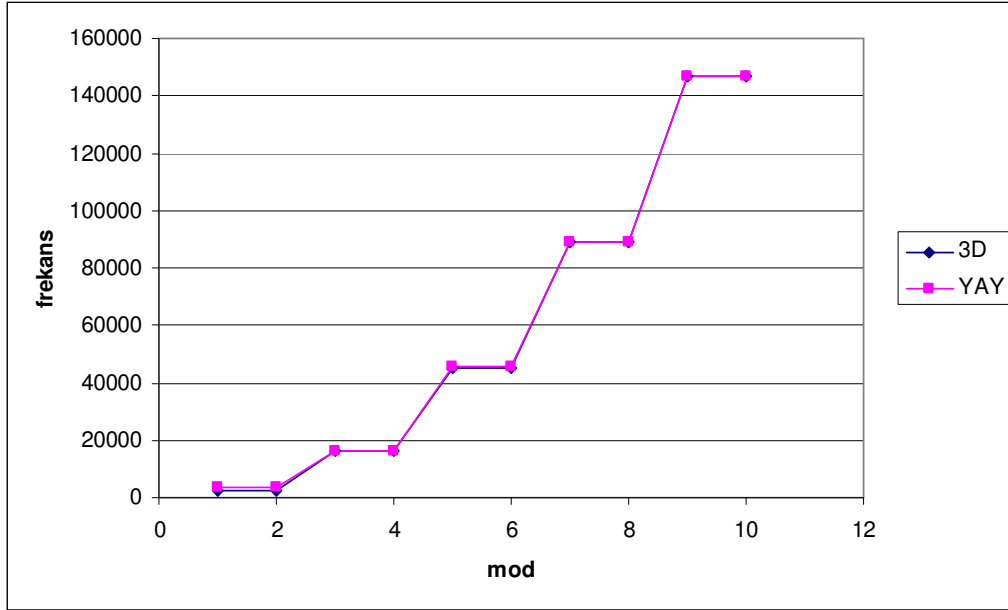
Şekil 4.8: Bor elyaf ve yaylı system analizleri kritik yük değerleri grafiği

Aynı şekilde frekans değerleri karşılaştırıldığında ilk iki modun oranı 1.47 iken diğer sekiz modda değerler yine yaylı system frekansları yüksek olmasına rağmen birbirine çok yakındır. Şekil 4.9'da serbest titreşim frekans değerleri karşılaştırması görülmektedir.



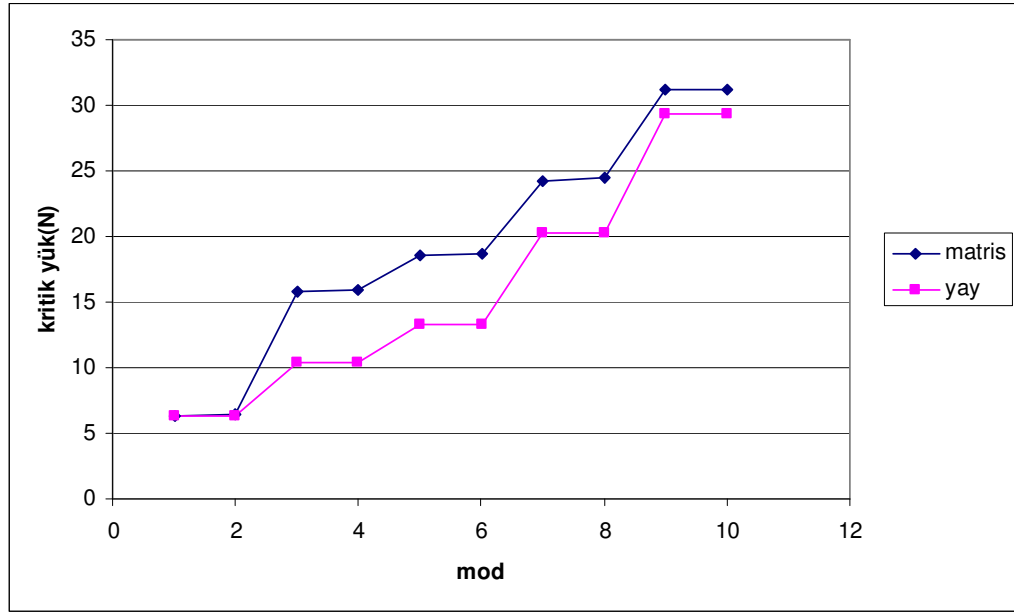
Şekil 4.9: Bor elyaf ve yaylı sistem analizleri serbest titreşim frekans değerleri grafiği

Bir boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan elyaf-yay sistemi analizinde elde edilen sonuçlarla üç boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan elyaf-yay sistemi analizinde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında bu değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Bu karşılaştırma Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Bir boyutlu ve üç boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan elyaf yay sistemi analizleri kritik yük değerleri

Dolayısıyla görülmektedir ki yay kullanıldığı zaman elde edilen kritik yükler, üç boyutlu elyaf analizinde elde edilen değerlerden biraz büyük, ancak matris içine yerleştirilmiş elyaf kullanılarak yapılan analiziyle elde edilen verilerden oldukça küçüktür. Bu nedenle elyaf-yay sisteminin elyaf-matris sistemine benzerlik göstermesi için yay katsayısı sürekli artırılarak analizler yapılmıştır. Yay katsayısı 1500 değerine ulaştığında elyaf-matris sistemi analizinde elde edilen kritik yük değerine oldukça yakın bir sonuç bulunmuştur. Bu karşılaştırma şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11: Elyaf-yay ($k=1500$) ve elyaf-matris analizleri kritik yük karşılaştırmaları

Böylelikle uzun zaman alan elyaf matris sistemi analizi yerine elyaf yay sistemi analizi yapılmasının da geçerli olabileceği gösterilmiştir.

YORUM

Bu tez süresince yapılan çalışmada, elyafın burkulmaya karşı olan direnci tek başına, matris içinde ve yaylı sistemlerle sabitlenerek incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde bir boyutlu bor elyaf analizinde ve üç boyutlu bor elyaf analizinde yapılan sonuçlar göstermektedir ki elde edilen kritik burkulma yükleri birbirine çok yakındır

Aynı şekilde serbest titreşim frekansları örtüşmektedir. Teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen kritik yük değerinin, yapılan iki analiz içinde en çok bir boyutlu elyaf analizi sonucuna yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu da bize kurulan modelin ve ANSYS yardımıyla yapılan analizin doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Cam elyaf için yapılan analiz sonucunda elde edilen değerler teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen değerlerle uyum göstermektedir. Aynı uzunlukta ancak malzeme özelliklerinin gerektirdiği biçimde farklı yarıçaplara sahip olan bor elyaf ve cam elyaf değerleri karşılaştırıldığında cam elyaf için elde edilen kritik yük değerinin bor elyaf analizinde elde edilen kritik yük değerine göre oldukça küçük olduğu gözlemlenmiştir.

Karbon elyaf için elde edilen değerlere bakıldığında görülmektedir ki ortotropik malzeme kullanılarak yapılan analiz ile elde edilen kritik burkulma yükleri, izotropik malzeme kullanılarak elde edilen kritik burkulma yüklerinden çok daha küçüktür. Bunun nedeni ortotropik malzemede kayma modülünün izotropik malzemeye göre küçük olmasıdır. Kayma modülünün kritik burkulma yükü üzerinde etkili olduğu önceki çalışmalarda gösterilmiştir [15]. Serbest titreşim frekansları karşılaştırıldığında benzer bir durum gözükmektedir

Aynı uzunlukta ve aynı yarıçapa sahip olarak modellenmiş bir cam elyafın kritik yükü karbon elyafın kritik yükünden yaklaşık 6 kat daha yüksektir. Dolayısıyla aynı geometriye sahip sadece malzeme özellikleri farklı iki elyafta cam elyafın, burkulmaya karşı karbon elyafa göre çok daha dayanıklı olduğu söylenebilir

Aynı şekilde iki elyafın serbest titreşim frekansları karşılaştırıldığında cam elyafın serbest titreşim frekanslarının, karbon elyafın serbest titreşim frekanslarından daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla aynı uzunluktaki üç elyaf tipi karşılaştırıldığı zaman burkulmaya karşı en dayanıklı elyafın bor elyaf olduğu

görülmüştür. Bunda, bor elyafın elastisite katsayısının büyüklüğü ve malzeme özelliklerinden kaynaklanan yarıçap oranının önemi gözlemlenebilmektedir. Ardından aynı uzunluktaki cam elyaf burkulmaya karşı direnç gösterirken karbon elyafın burkulma kritik yükü bu üç elyaf tipi arasındaki en küçük değerdir. Elyaf ve matris birleştirildiği zaman elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığı zaman, matrisin yük konulan üst alanı hariç tüm alanları sabitlenerek yapılan analizde elde edilen değer, alanlardan sadece alt yüzey sabitlendiği zaman elde edilen kritik yükün yaklaşık 19.6 katı olduğu gözlemlenmiştir. Yani matris sabitlendiği zaman burkulmaya uğraması çok daha zor olmuştur. Ancak bu oran mod sayısı yükseldikçe azalmıştır ve son modlar karşılaştırıldığında oranın 1.49 gibi ilk modda elde edilen değerden oldukça küçük olduğu gözlemlenmiştir. Matris içine yerleştirilen dört adet bor elyaftan oluşan modelin analizinde elde edilen sonuçlar, matris içinde tek bir elyaf yerleştirilmesiyle elde edilen sonuçlardan oldukça büyük çıkmıştır. Dörtlü elyaf sisteminde elde edilen sonuç, tek elyaf sisteminde elde edilen sonucun yaklaşık 162 katı olarak bulunmuştur. Bu değer de mod sayıları yükseldikçe azaldığı gözlemlenmiştir ve son modda bu oran 56 katı olarak hesaplanmıştır. 20 adet yay kullanılarak yapılan analiz sonucunda elde edilen kritik yük değeri, üç boyutlu bor elyaf analizinde elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında görülmüştür ki yaylı sistemin ilk iki moddaki kritik yük değeri üç boyutlu bor elyaf sisteminin analizi sonucunda elde edilen değerlerin yaklaşık iki katıdır. Ancak diğer sekiz modda bu oranlar yine de üç boyutlu elyaf değerlerinden yüksek olmasına rağmen çok yaklaşmıştır. Aynı şekilde frekans değerleri karşılaştırıldığında ilk iki modun oranı 1.47 iken diğer sekiz modda değerler yine yaylı system frekansları yüksek olmasına rağmen birbirine çok yakındır. Bir boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan elyaf-yay sistemi analizinde elde edilen sonuçlarla üç boyutlu elemanlar kullanılarak yapılan elyaf-yay sistemi analizinde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında bu değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Dolayısıyla görülmektedir ki yay kullanıldığı zaman elde edilen kritik yükler, üç boyutlu elyaf analizinde elde edilen değerlerden biraz büyük, ancak matris içine yerleştirilmiş elyaf kullanılarak yapılan analiziyle elde edilen verilerden oldukça küçüktür. Bu nedenle elyaf-yay sisteminin elyaf-matris sistemine benzerlik göstermesi için yay katsayısı sürekli artırılarak analizler yapılmıştır. Yay katsayısı 1500 değerine ulaştığında elyaf-matris sistemi analizinde elde edilen kritik yük değerine oldukça yakın bir sonuç bulunmuştur. Böylelikle uzun zaman alan elyaf

matris sistemi analizi yerine elyaf yay sistemi analizi yapılmasının da geçerli olabileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmaya devam edilmesi durumunda, analiz içerisindeki yay sistemleri artırılarak ve doğru yay katsayısı kullanılarak matrisin yerine yay sistemleri getirilebilir ve analizler daha kısa zamanda yapılabilir. Dörtlü elyaf-matris sistemi çok uzun zaman aldığından ve elyaflar, kompozit malzemelerde çok sayıda bulunduğundan, benzer bir çalışmada yay sistemleri kullanılabilir ve daha kısa zamanda çözüme ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

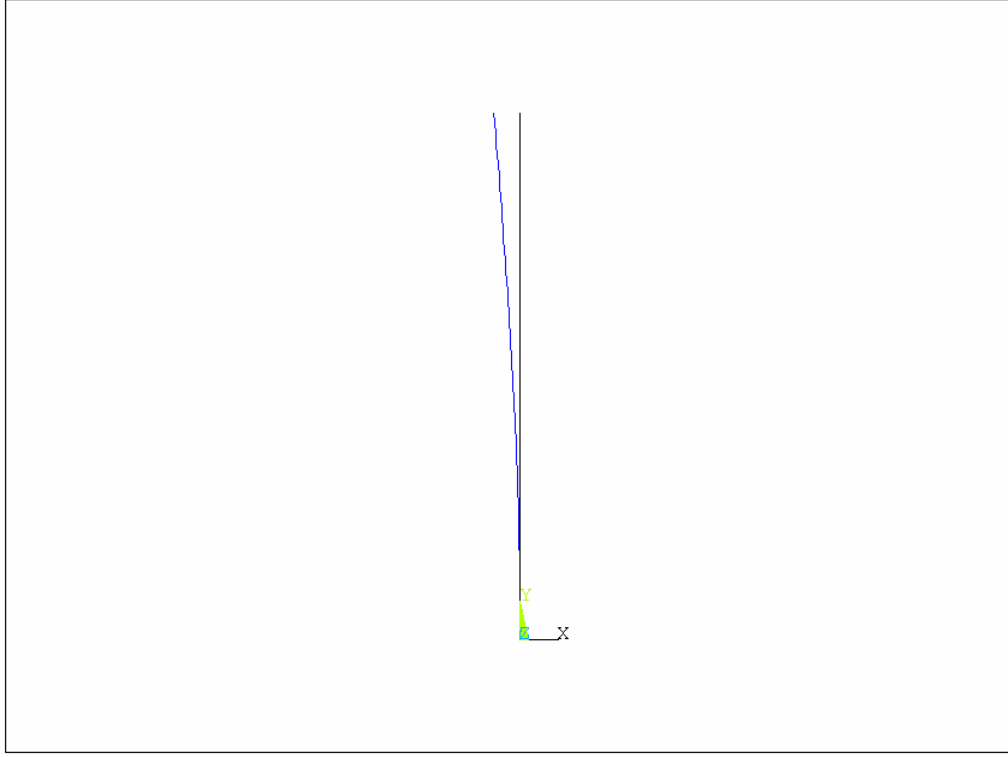
- [1] **Soykasap, Ö.**, 2001. Malzeme özellikleri sıcaklığa bağlı bir kolonun burkulması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **7**, 29-41
- [2] **Tehami, M.**, 1997. Local Buckling in Class 2 Continuous Composite Beams, *Journal of Construction Steel Res*, **43**, 141-159
- [3] **Vodenitcharova, Z, Zhang L.C.**, 2006. Bending and local buckling of a nanocomposite beam reinforced by a single-walled carbon nanotube, *International journal of solids and structures*, **43**, 3006-3024
- [4] **Quiao, P, Shan, L.**, 2005. Explicit local buckling analysis and design of fiber-reinforced plastic composite structural shapes, *Composite structures*, **70**, 468-483
- [5] **Austin, C.D.**, 2003. Buckling of symmetric laminated fiberglass reinforced plastic(FRP) plates, , *Yüksek Lisans Tezi*, University of Pittsburgh
- [6] **Montagnier, O., Hochard, C.**, 2004. Compression characterization of high-modulus carbon fibers, *Journal of composite materials*, **39**, 35-49
- [7] **Hwang, S., Liu, G.**, 2002. Experimental study for buckling and postbuckling behaviours of composite laminates with multiple delaminations, *Journal of reinforced plastics and composites*, **21**, 333-349
- [8] **Ganesan, R., Kowda, V.K.**, 2005. Buckling of composite beam-columns with stochastic properties, *Journal of reinforced plastics and composites*, **24**, 513-543
- [9] **Papila, M. Akgün, M.**, 2001. Post-Buckling of composite I-Sections. Part 1: Theory, *Journal of composite materials*, **35**, 774-796
- [10] **Polyzois, D., İbrahim, S., Raftoyiannis, I.G.**, 1998. Performance of fiber-reinforced plastic tapered poles under lateral loading, *Journal of composite materials*, **33**, 941-960

- [11] **Zheng, Z., Engblom, J.J.**, 2002. Fiber local micro buckling of continuous glass-fiber reinforced rectangular hollow-cored commingled recycled plastic extrusions under bending, *Journal of reinforced plastics and composites*, **21**, 517-531
- [12] **Shan, B, Pelegri, A.**, 2003. Approximate Analysis of the buckling behaviour of composites with delamination, *Journal of composite materials*, **37**, 673-685
- [13] **Zheng, Y.**, 2004. Glass fiber-reinforced polymer composites of high compressive strength, *Journal of reinforced plastics and composites*, **23**, 1729-1740.
- [14] **Basu, S., Waas, A.M., Ambur D.R.**, 2005. Compressive failure of fiber composites under multi-axial loading, *Journal of mechanics and physics of solids*, **54**, 611-634
- [15] **Lapusta, Y, Wagner, W.**, 2005. Effects of fiber anisotropy n the microbuckling loads for a fiber composite, *International journal of fracture*, **131**, 53-59
- [16] **Sutcliffe, M.P.F., Yuwono, A.H.**, 2001. Experimental study of microbuckle initiation in a model composite system, *Scripta Materiala*, **45**, 831-837.
- [17] **Drapier,S.,Grandidier,J., Potier-Ferry, M.**, 1997. A non-linear numerical approach to the analysis of microbuckling, *Composites science and technology*, **58**, 785-790.
- [18] **Berbinau, P.,Soutis C., Guz, I.A.**, 1998. Compressive failure of 0° unidirectional carbon- fibre-reinforced plastic(CFRP) laminates by fibremicrobuckling, *Composites science and technology*, **59**, 1451-1455.
- [19] **Naik, N.K., Tiwari, S.I., Kumar, R.S.**, 2002. An analytical model for compressive strength of plain weave fabric composites, *Composites science and technology*, **63**, 609-625

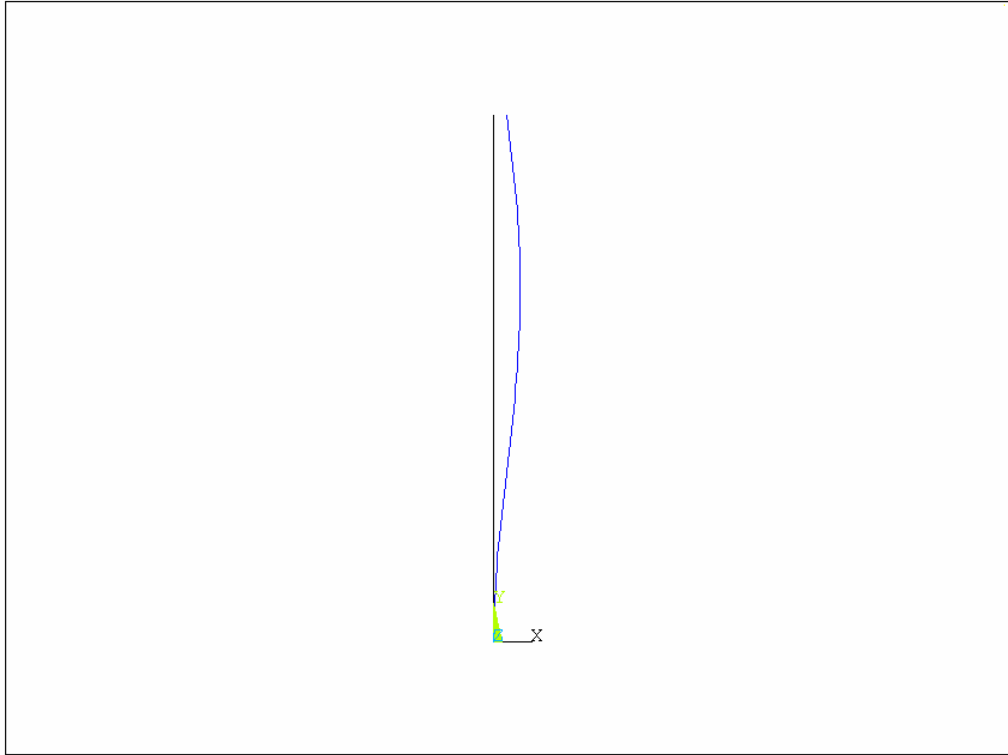
- [20] **Jochum, C., Grandidier, J.,** 2004. Microbuckling elastic modeling approach of a single carbon fibre embedded in an epoxy matrix, *Composites science and technology*, **64**, 2441-2449.
- [21] **Aghdam, M.M., Smith, D.J., Pavier, M.J,** 1999. Finite element micromechanical modeling of yield and collapse behaviour of metal matrix composites, *Journal of mechanics and physics of solids*, **48**, 499-528.
- [22] **Goutianos, S., Galiotis, C., Peijs, T.,** 2003. Mechanisms of stress transfer and interface integrity in carbon/epoxy composites under compression loading. Part II: Numerical approach, *International journal of solids and structures*, **40**, 5521-5538.
- [23] **Anthoine, O., Grandadier,J.C.** 1997. Pure compression testing of advanced fiber composites, *Composites science and technology*, **58**, 737-740.
- [24] **Goutianos, S., Galitois, C, Peijs, T.,** 2003. Compressive failure mechanisms in multi-fibre microcomposites, *Composites part A* , **35**, 461-475.
- [25] **Parnes, R., Chiskis, A.,** 2001. Buckling of nano-fibre reinforced composites: a re-examination of elastic buckling, *Journal of the mechanics and solids*, **50**, 855-879.
- [26] **Urfahoglu, Hünkar.,** 1991. Havacılık endüstrisinde kullanılan elyaf takviyeli plastic malzemeler ve yorulma, *Yüksek lisans tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [27] **Hoskin, B., Baker, A.,** 1989. Composite materials for aircraft structures, Reston, VA:American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1-43
- [28] **Tenek, L., Argyris, J.,** 1998. Finite element analysis for composite structures, Dordrecht : Kluwer Academic Publishers
- [29] **D. Hull, Clyne, T. W.,** 1996. An Introduction to Composite Materials, Cambridge : Cambridge University Press

- [30] **Chawla, K**, 1998, Composite Materials: Science and Engineering, New York:
Springer
- [31] **ANSYS** yardım dosyası eleman özellikleri

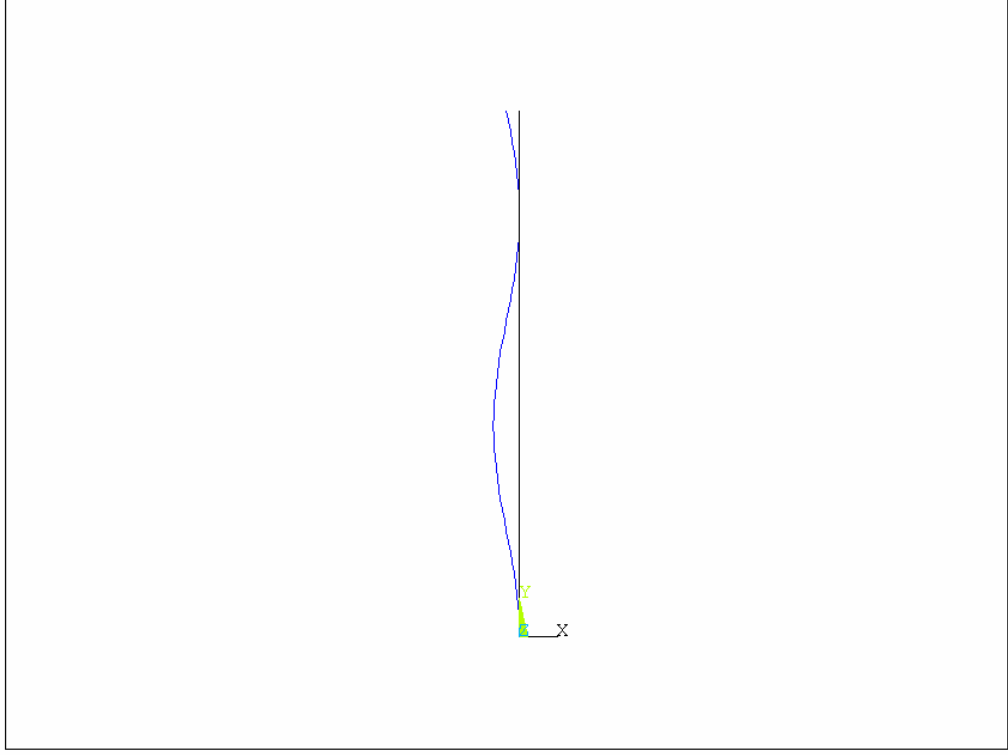
Ek A- Bir boyutlu bor elyaf analizi mod şekilleri



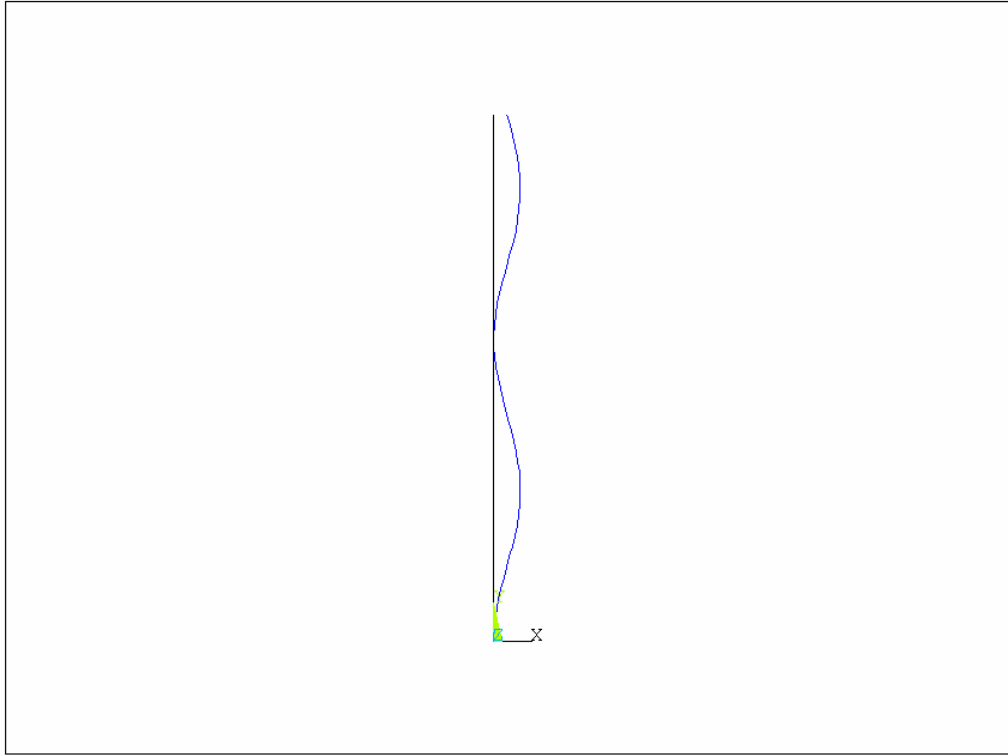
Şekil Ek A.1: Bir boyutlu bor elyaf analizi 1. mod şekli



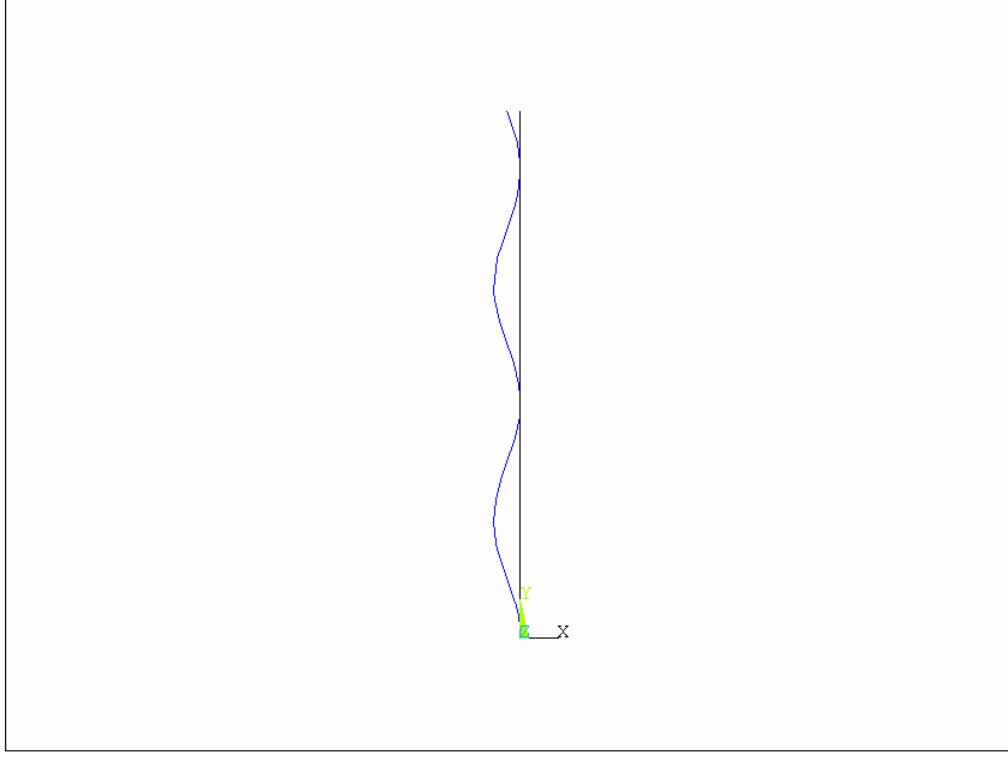
Şekil Ek A.2: Bir boyutlu bor elyaf analizi 2. mod şekli



Şekil Ek A.3: Bir boyutlu bor elyaf analizi 3. mod şekli

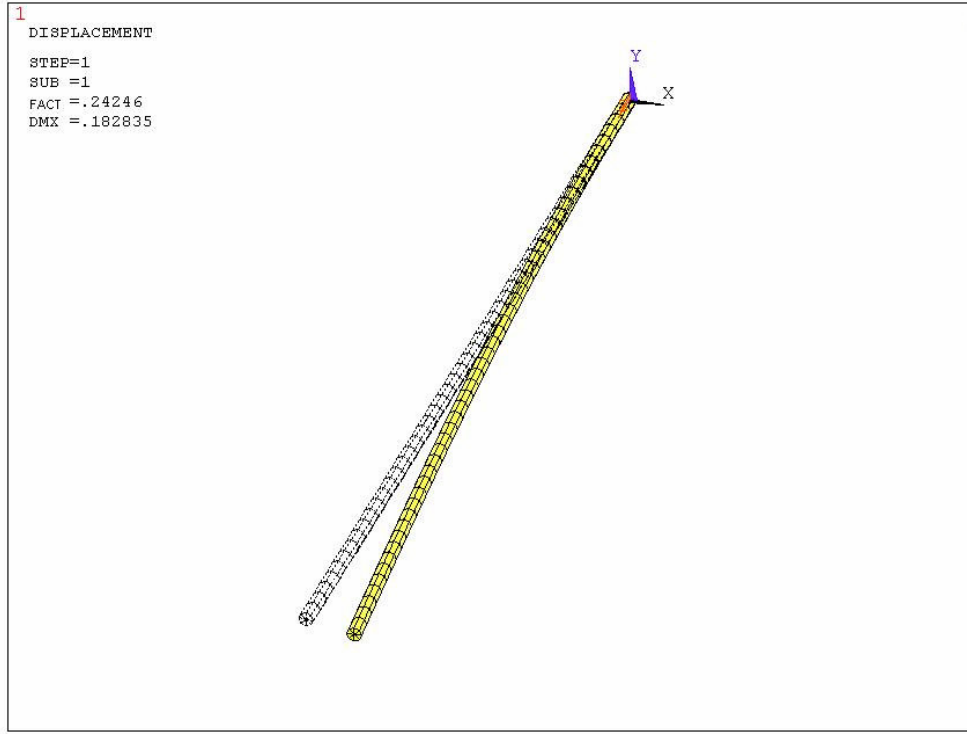


Şekil Ek A.4: Bir boyutlu bor elyaf analizi 4. mod şekli



Şekil Ek A.5: Bir boyutlu bor elyaf analizi 5. mod şekli

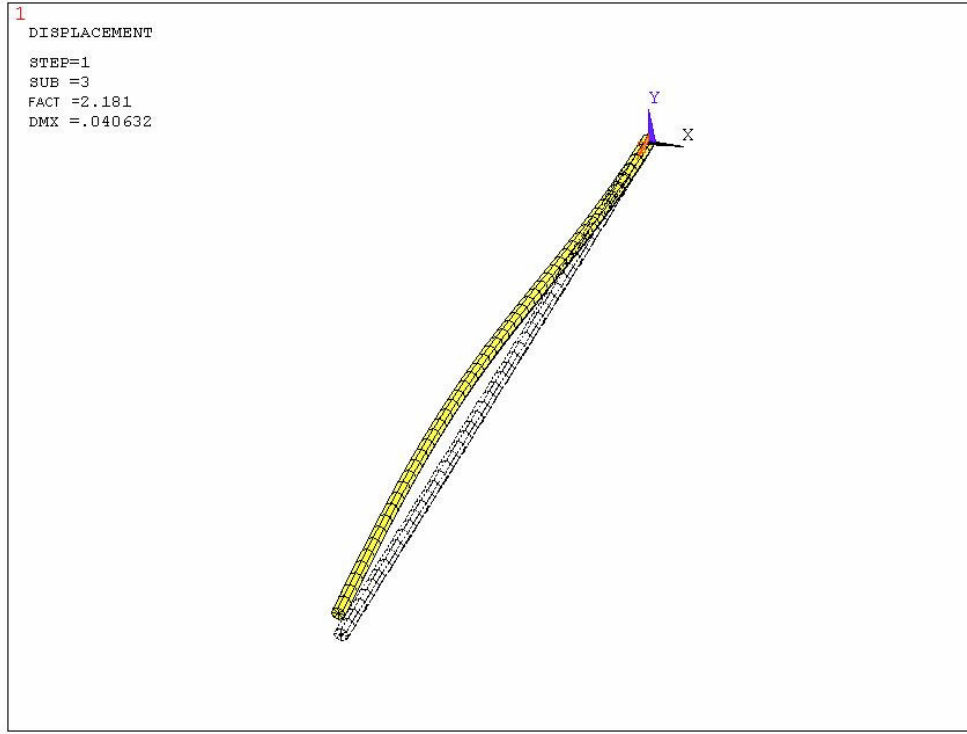
Ek-B Üç boyutlu bor elyaf analizi mod şekilleri



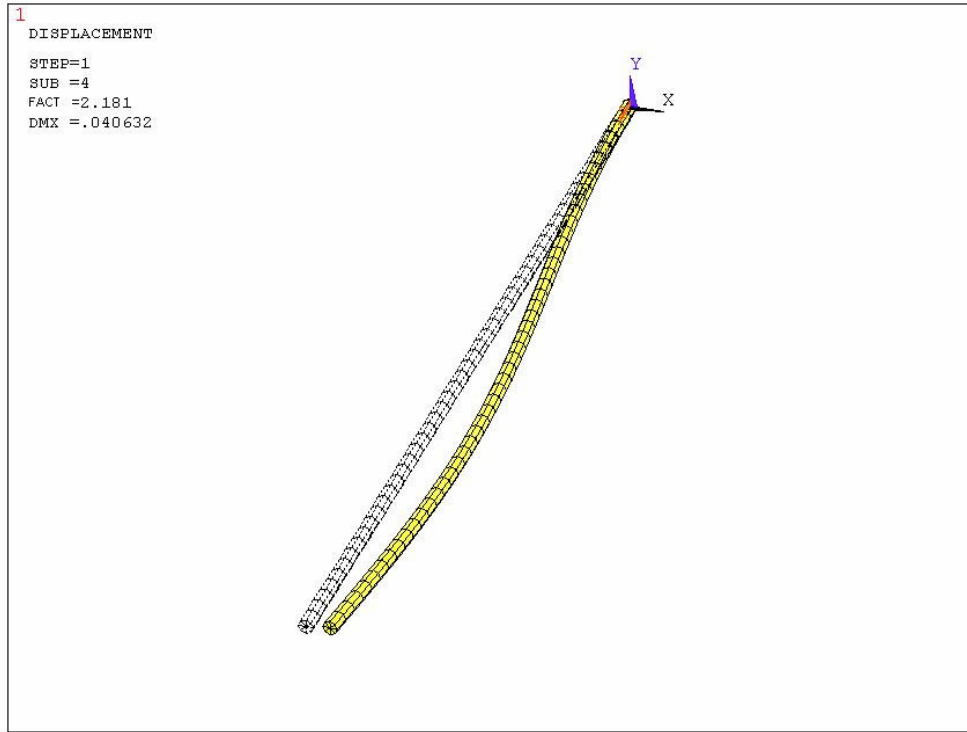
Şekil Ek B.1: Üç boyutlu bor elyaf analizi 1. mod şekli



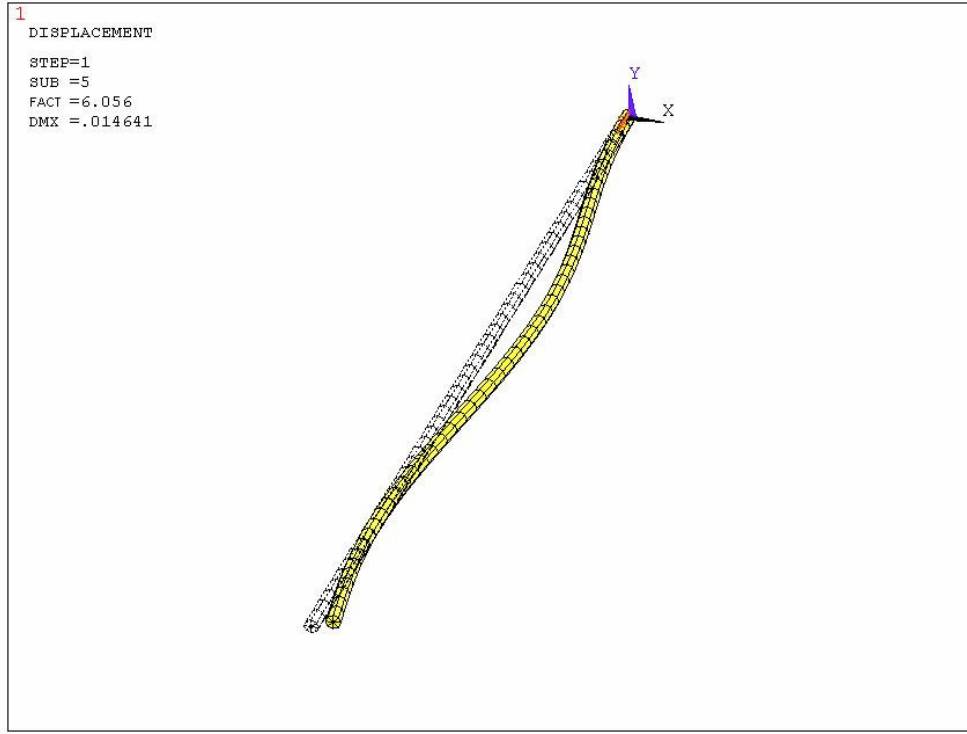
Şekil Ek B.2: Üç boyutlu bor elyaf analizi 2. mod şekli



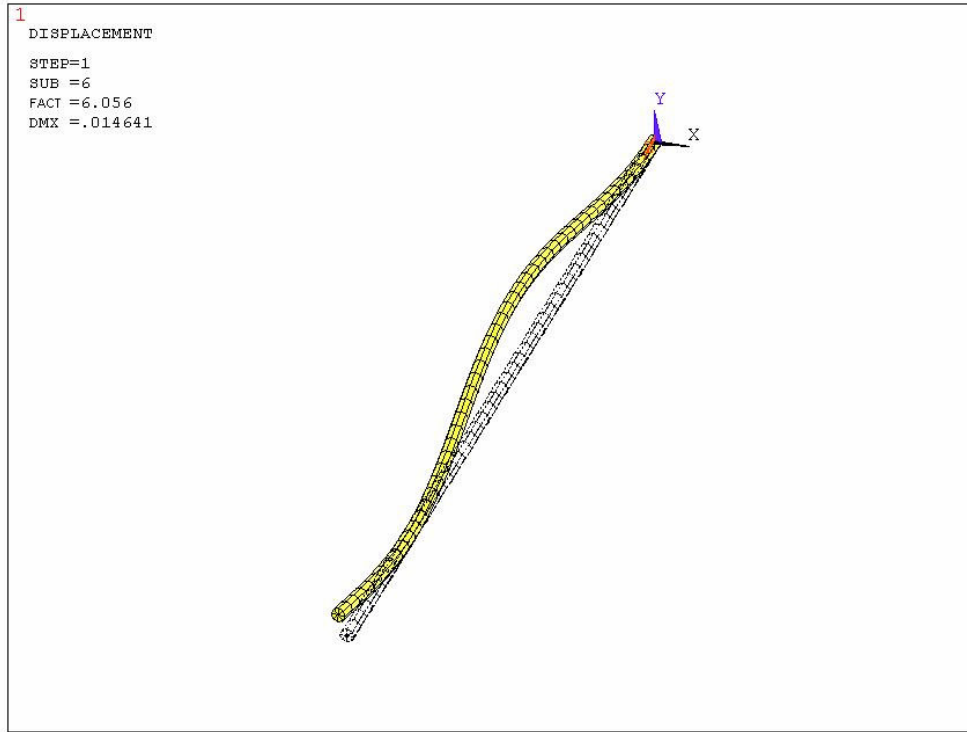
Şekil Ek B.3: Üç boyutlu bor elyaf analizi 3. mod şekli



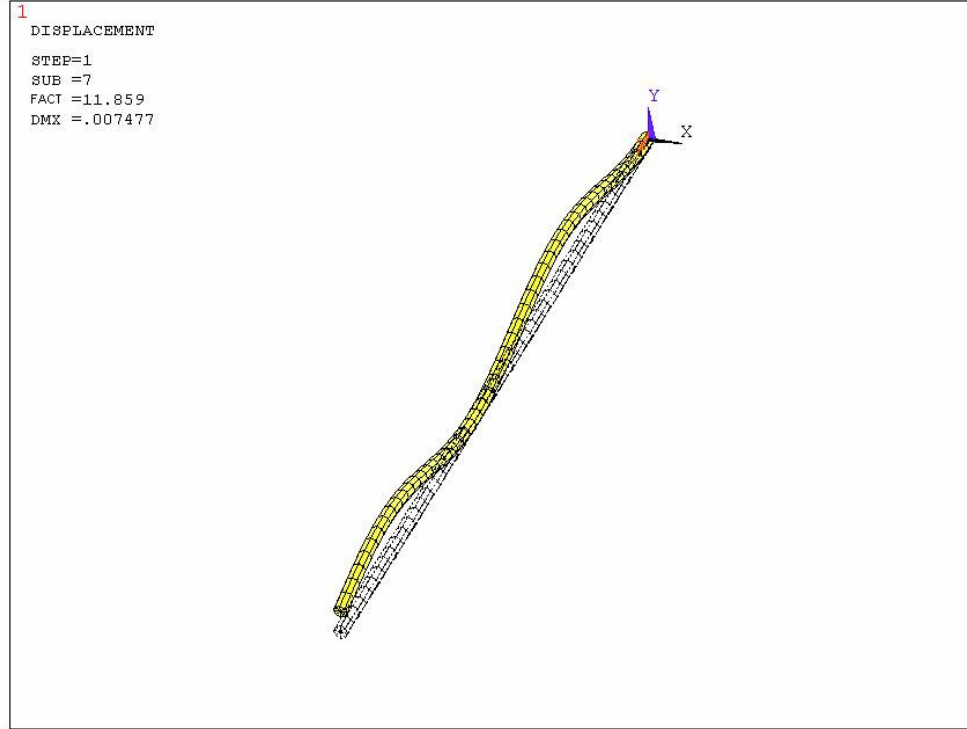
Şekil Ek B.4: Üç boyutlu bor elyaf analizi 4. mod şekli



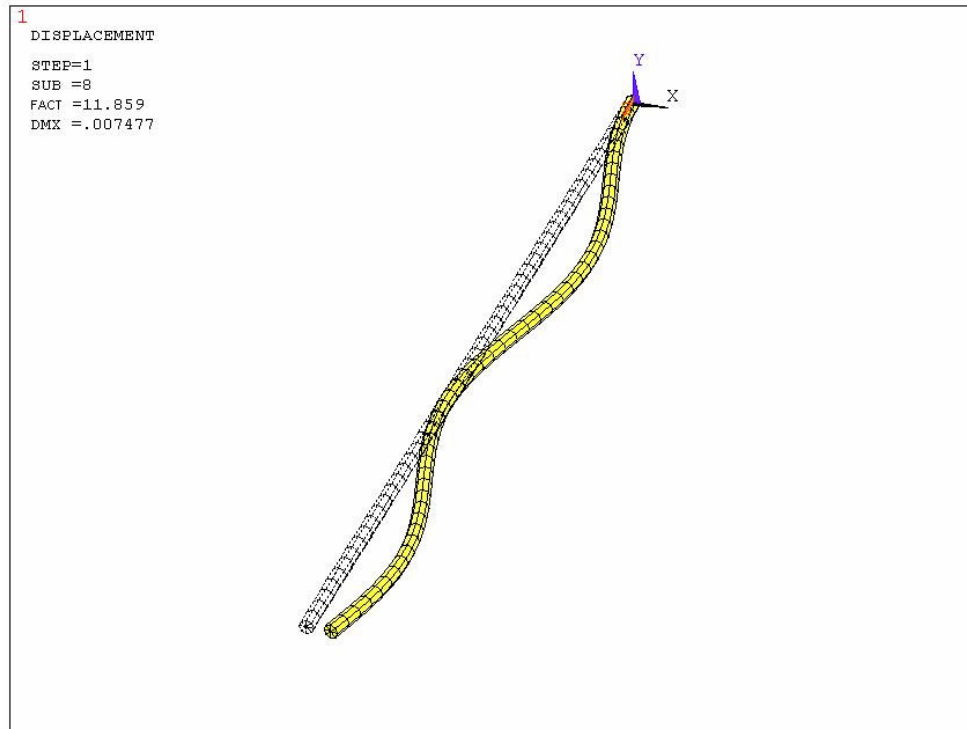
Şekil Ek B.5: Üç boyutlu bor elyaf analizi 5. mod şekli



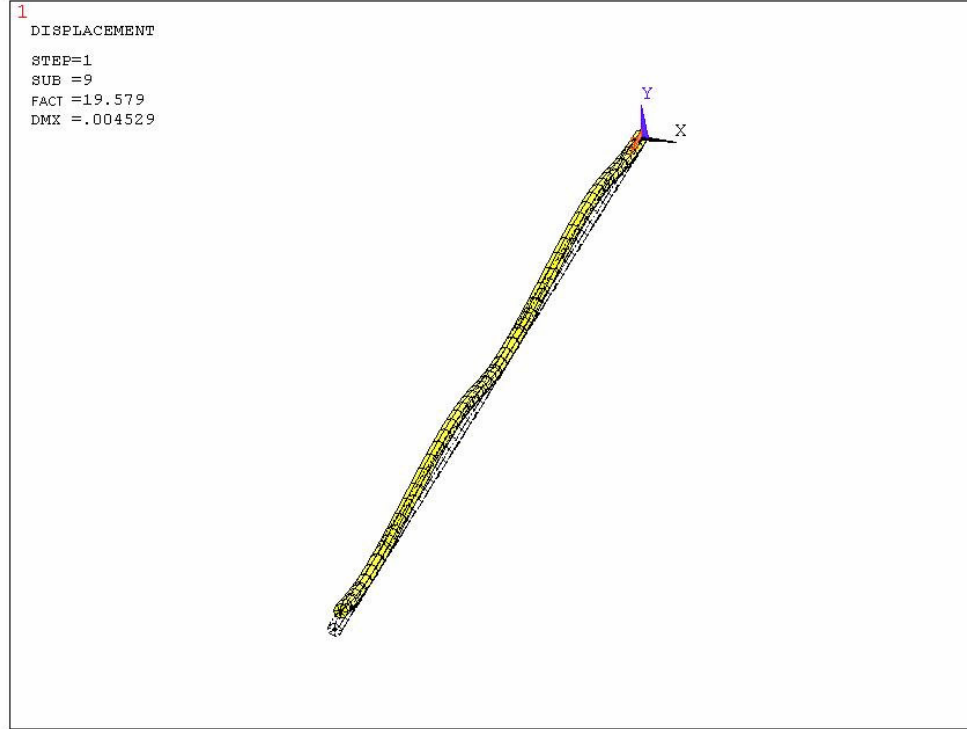
Şekil Ek B.6: Üç boyutlu bor elyaf analizi 6. mod şekli



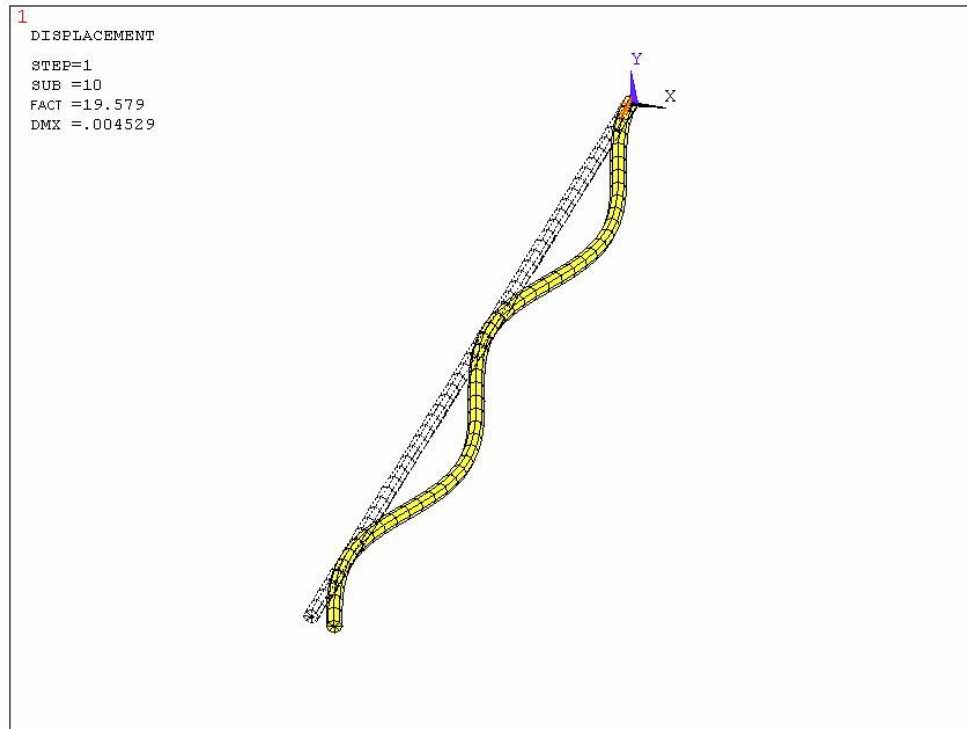
Şekil Ek B.7: Üç boyutlu bor elyaf analizi 7. mod şekli



Şekil Ek B.8: Üç boyutlu bor elyaf analizi 8. mod şekli

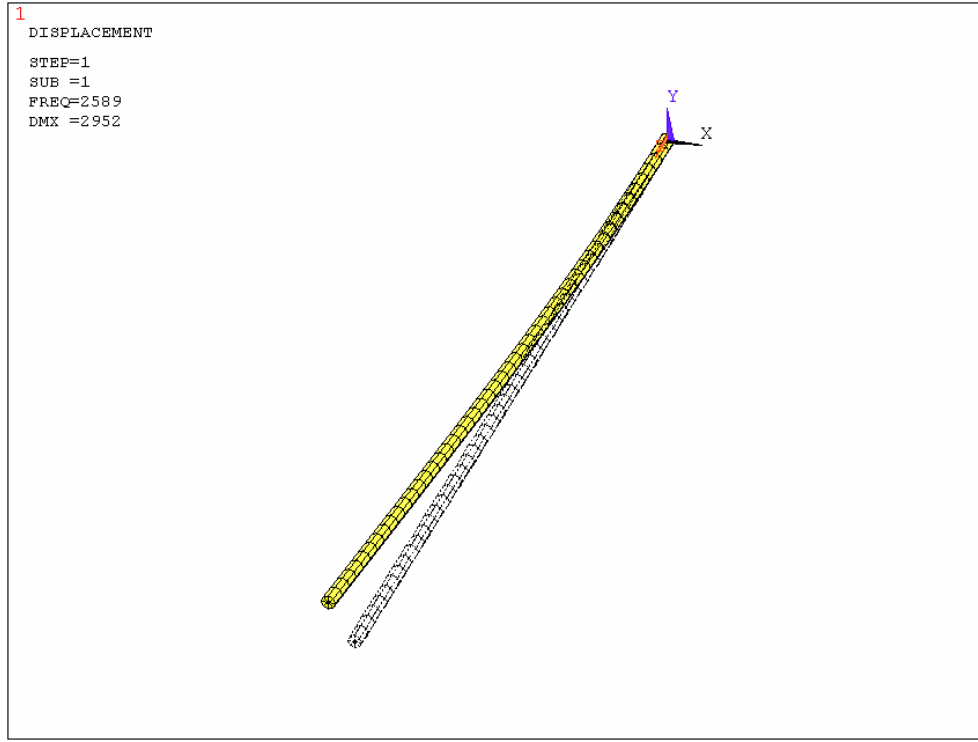


Şekil Ek B.9: Üç boyutlu bor elyaf analizi 9. mod şekli

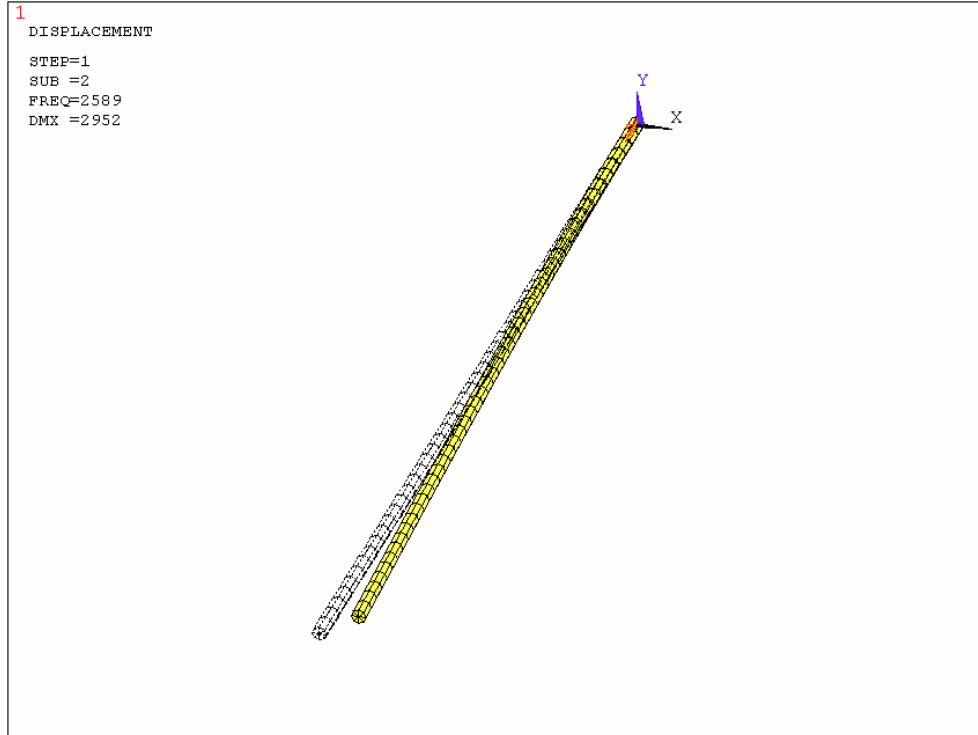


Şekil Ek B.10: Üç boyutlu bor elyaf analizi 10. mod şekli

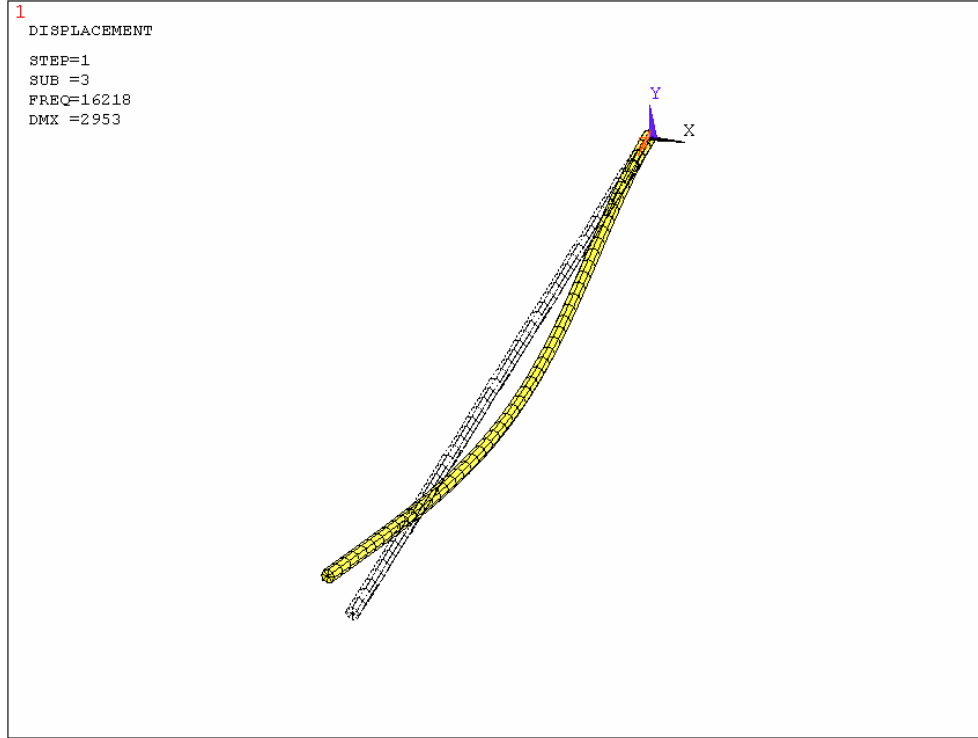
EkC- Üç boyutlu bor elyaf serbest titreşim analizi frekans şekilleri



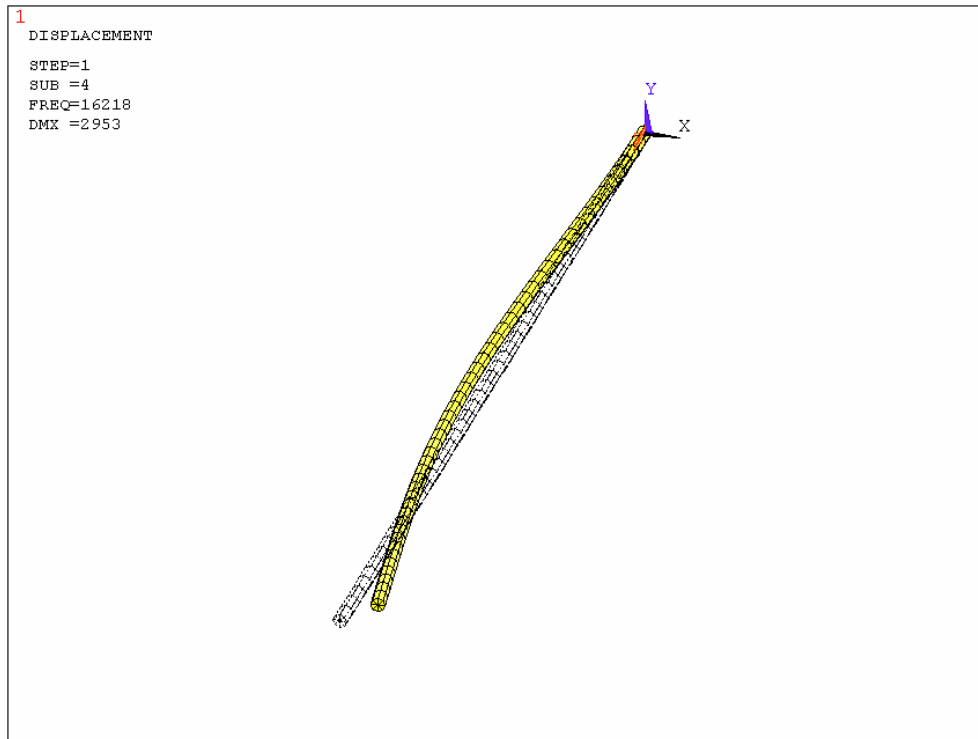
Şekil Ek C.1: Üç boyutlu bor elyaf serbest titreşim analizi 1. frekans şekli



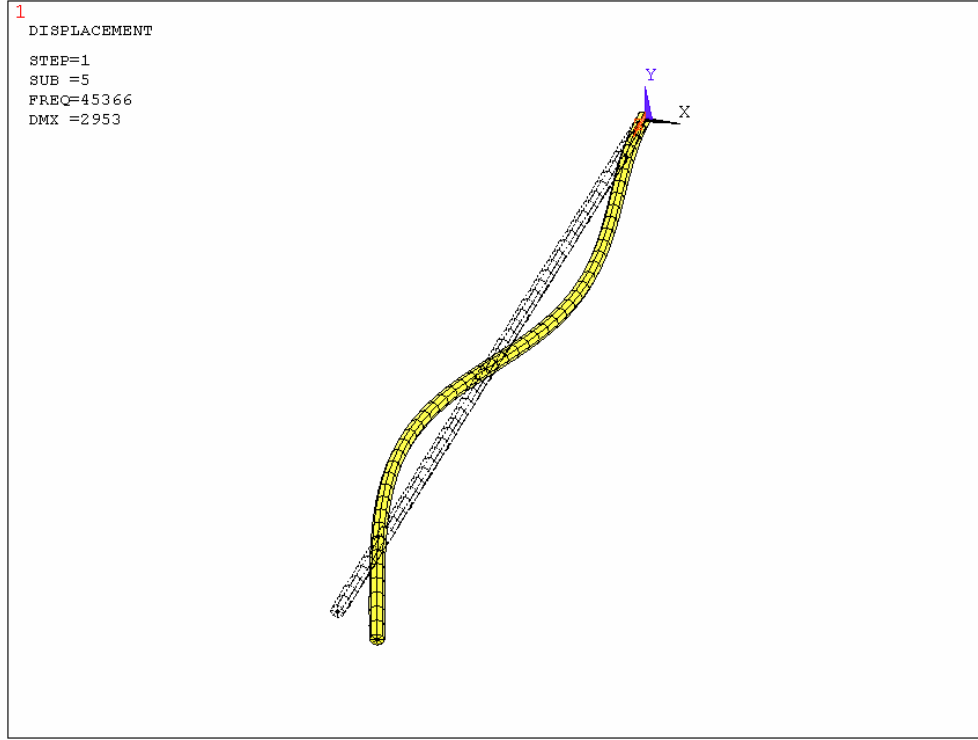
Şekil Ek C.2: Üç boyutlu bor elyaf serbest titreşim analizi 2. frekans şekli



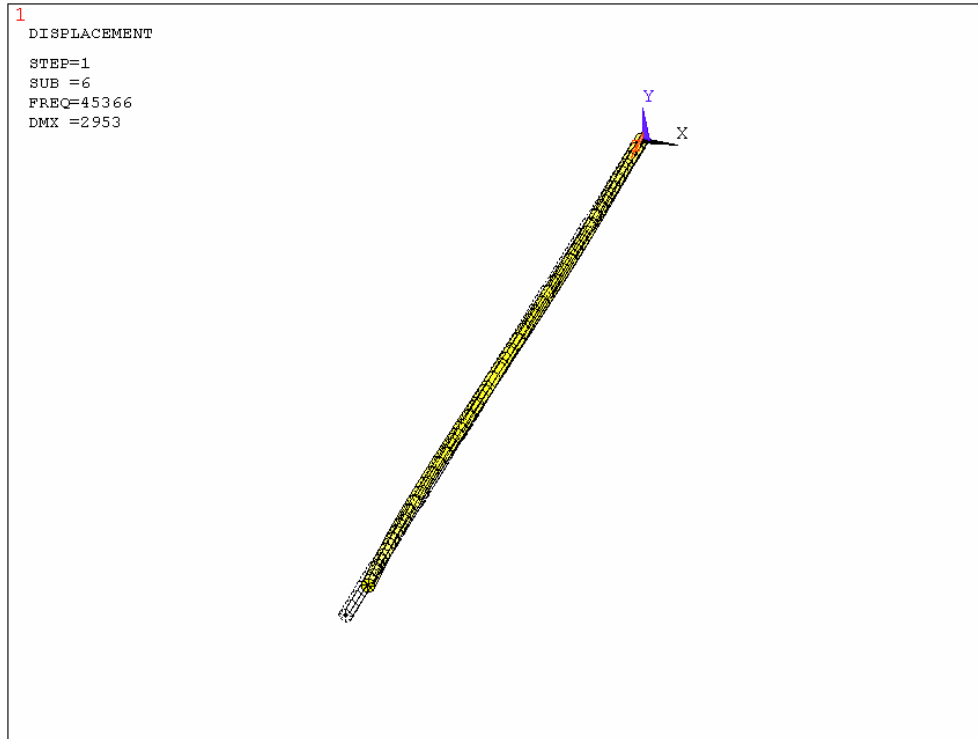
Şekil Ek C.3: Üç boyutlu bor elyaf serbest titreşim analizi 3. frekans şekli



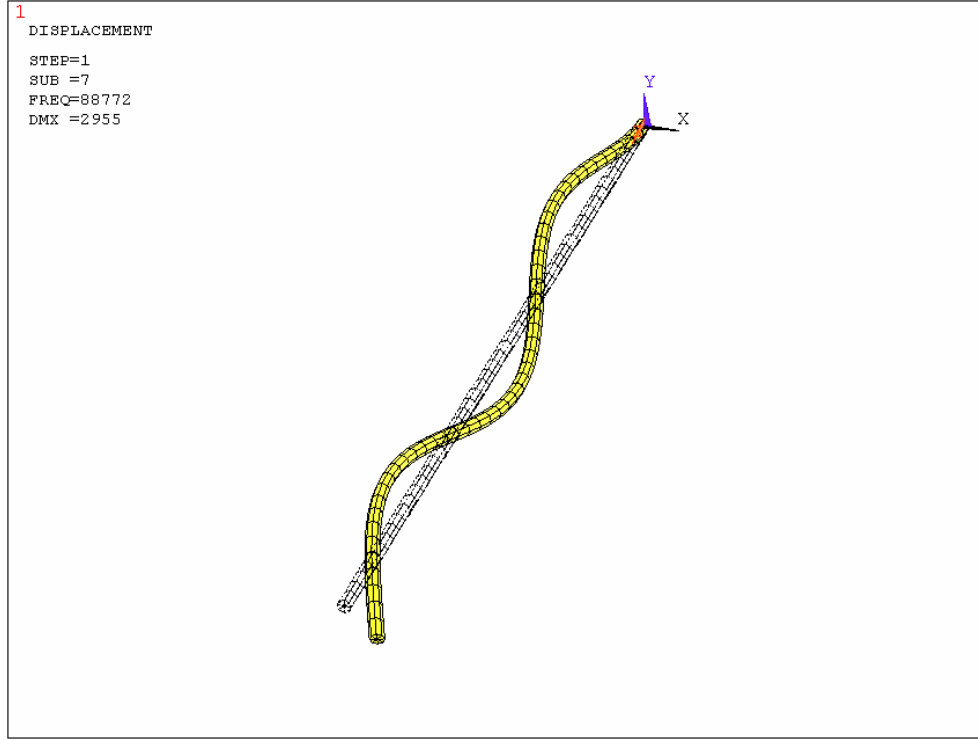
Şekil Ek C.4: Üç boyutlu bor elyaf serbest titreşim analizi 4. frekans şekli



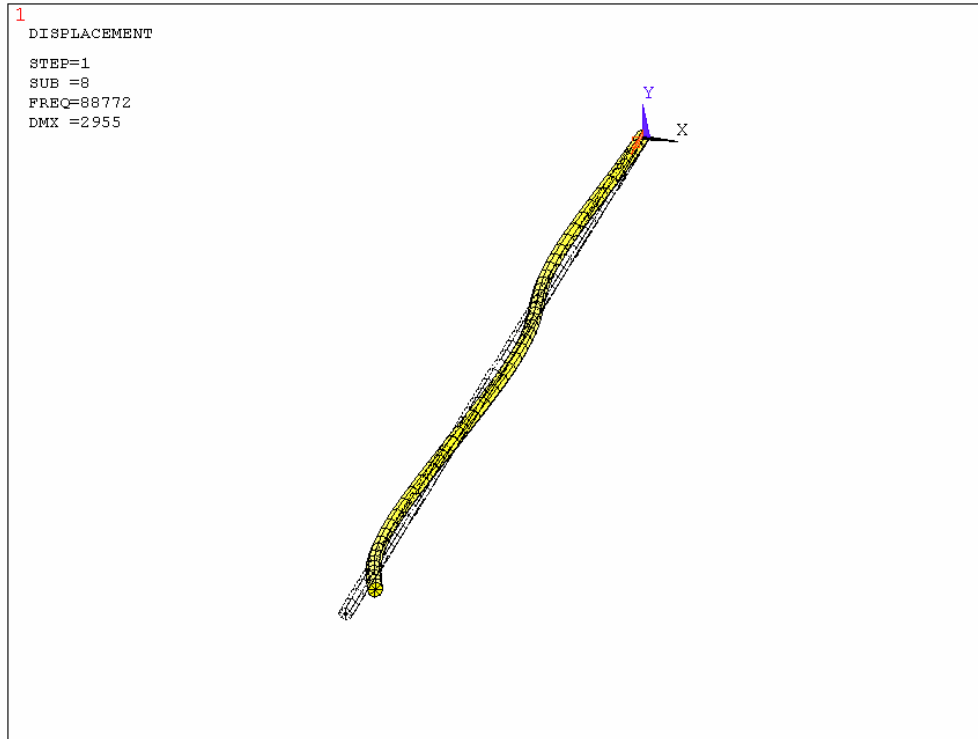
Şekil Ek C.5: Üç boyutlu bor elyaf serbest titreşim analizi 5. frekans şekli



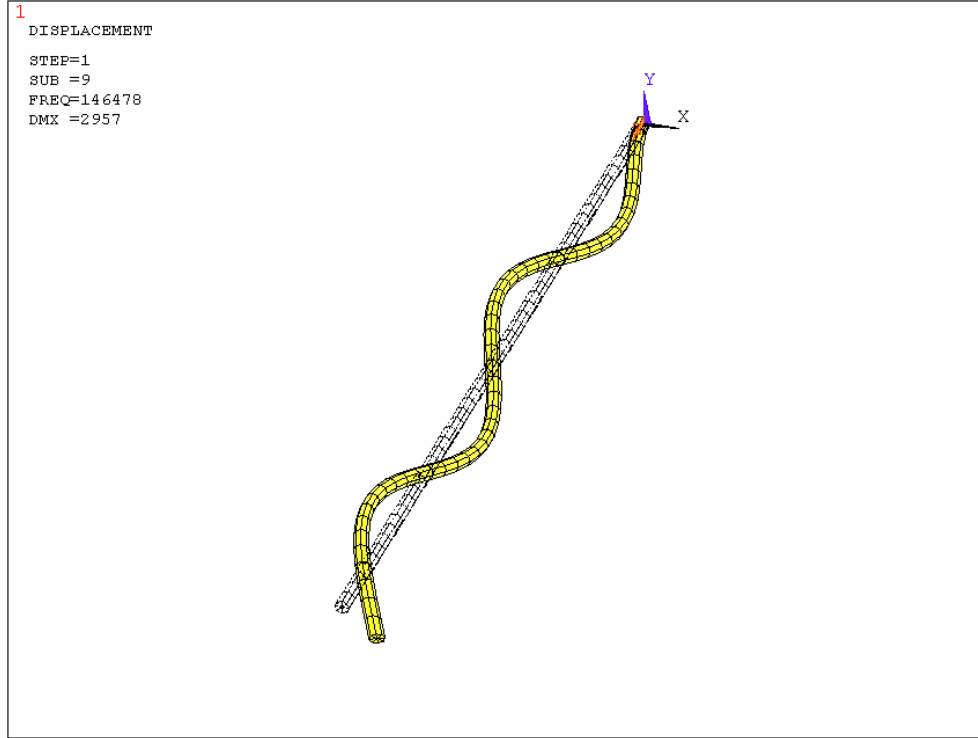
Şekil Ek C.6: Üç boyutlu bor elyaf serbest titreşim analizi 6. frekans şekli



Şekil Ek C.7: Üç boyutlu bor elyaf serbest titreşim analizi 7. frekans şekli



Şekil Ek C.8: Üç boyutlu bor elyaf serbest titreşim analizi 8. frekans şekli

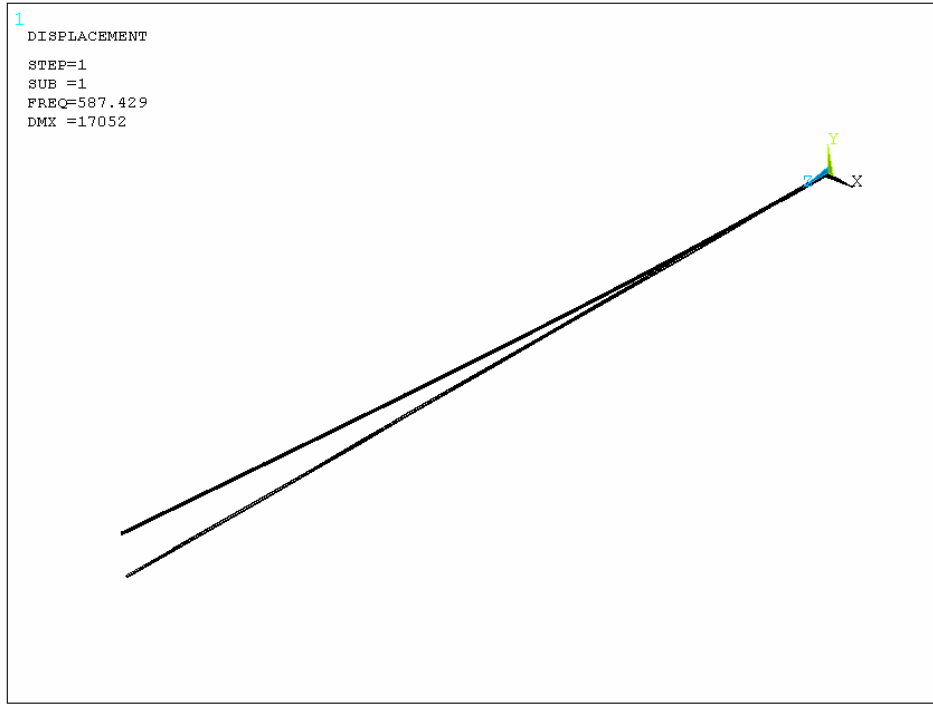


Şekil Ek C.9: Üç boyutlu bor elyaf serbest titreşim analizi 9. frekans şekli

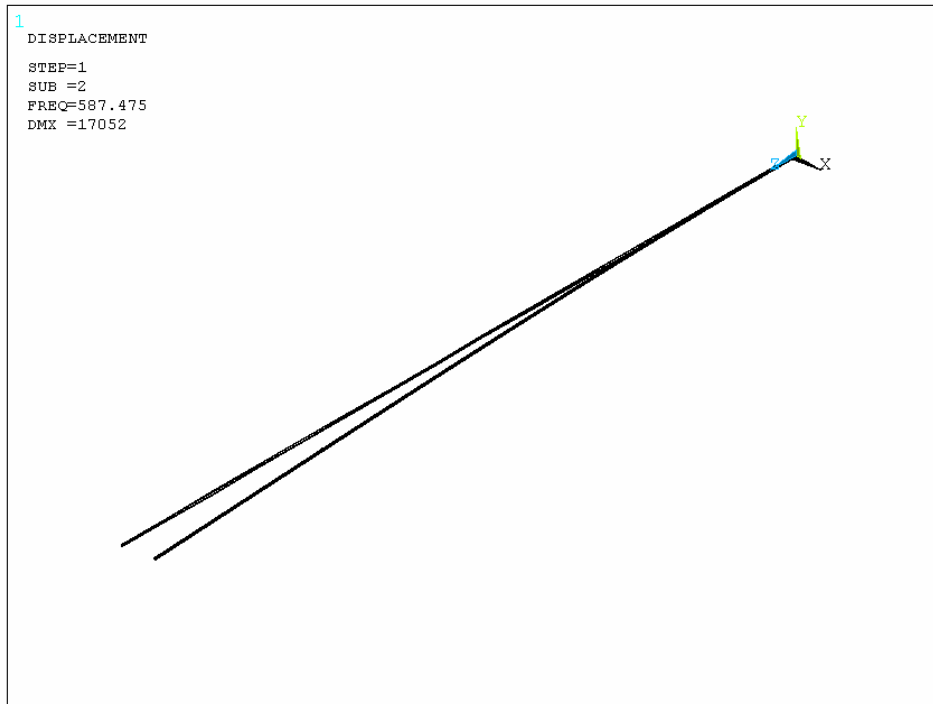


Şekil Ek C.10: Üç boyutlu bor elyaf serbest titreşim analizi 10. frekans şekli

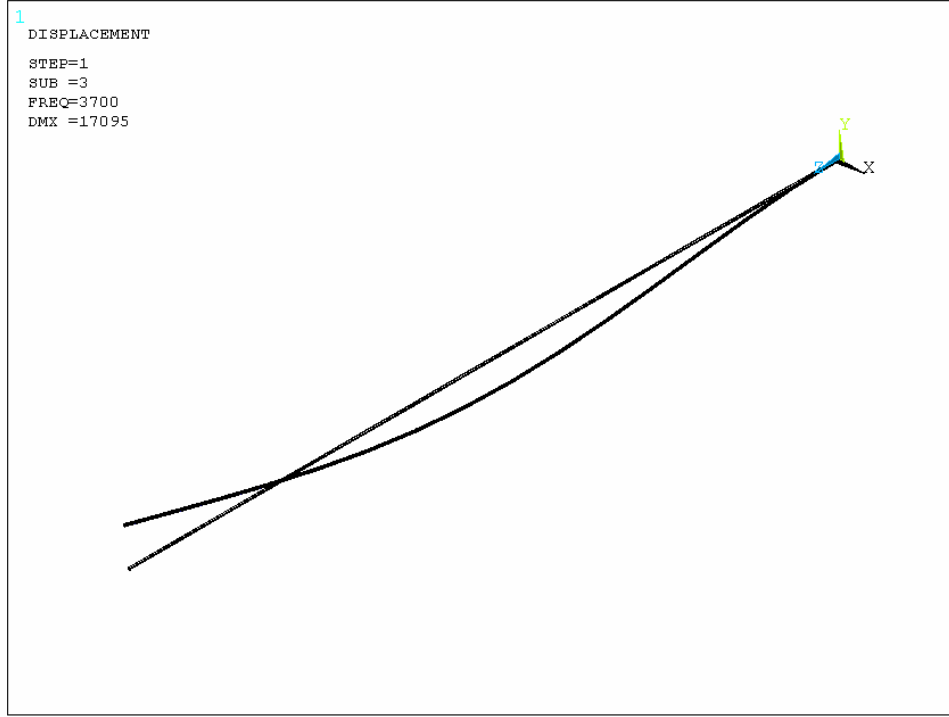
Ek D. İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi frekans şekilleri



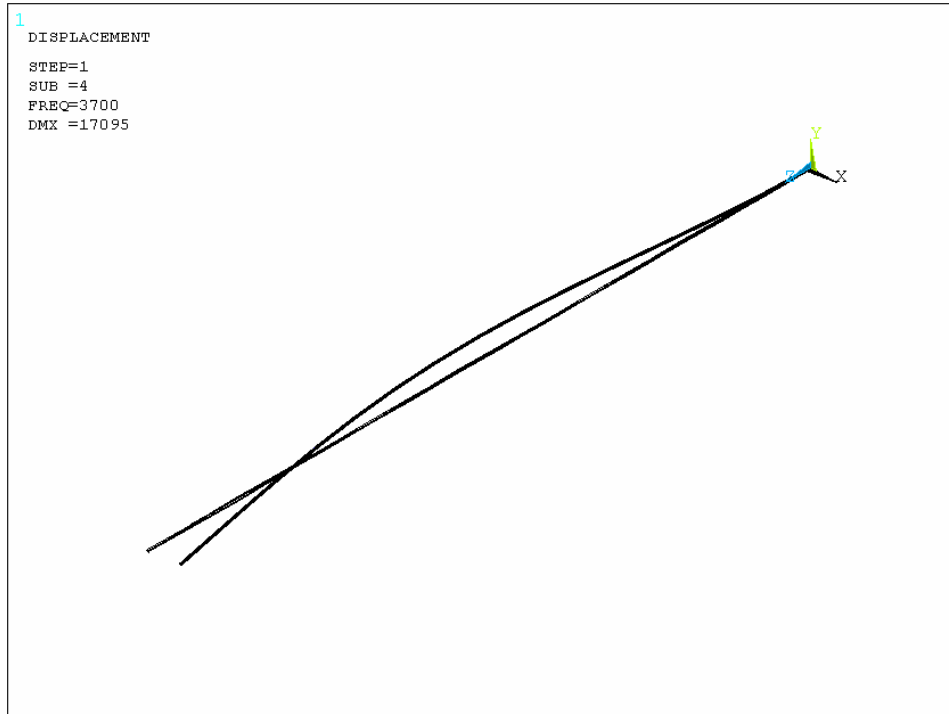
Şekil Ek D.1: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 1. frekans şekli



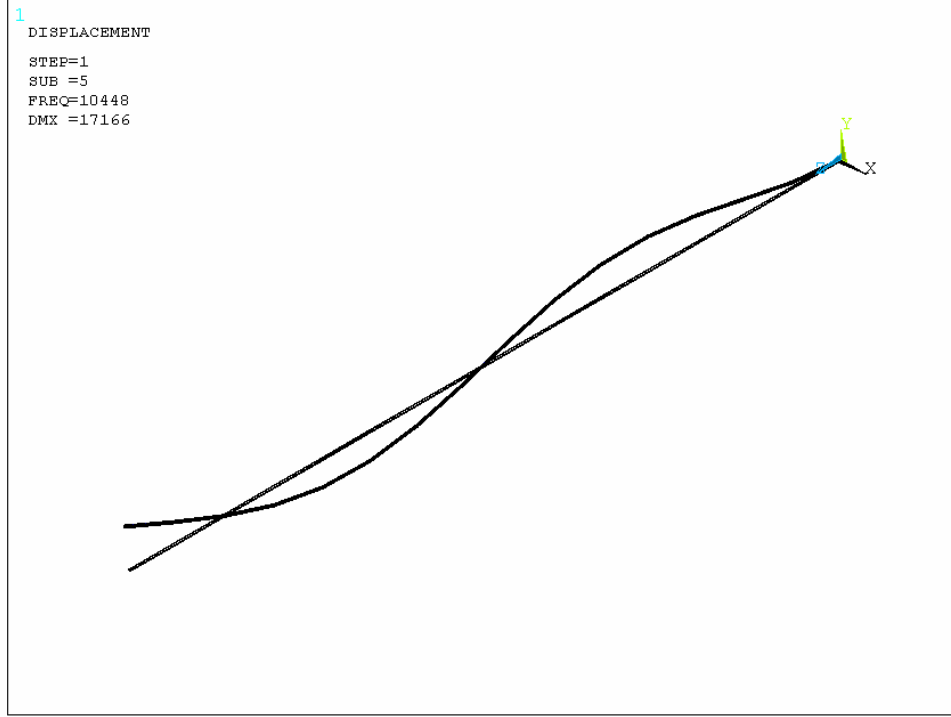
Şekil Ek D.2: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 2. frekans şekli



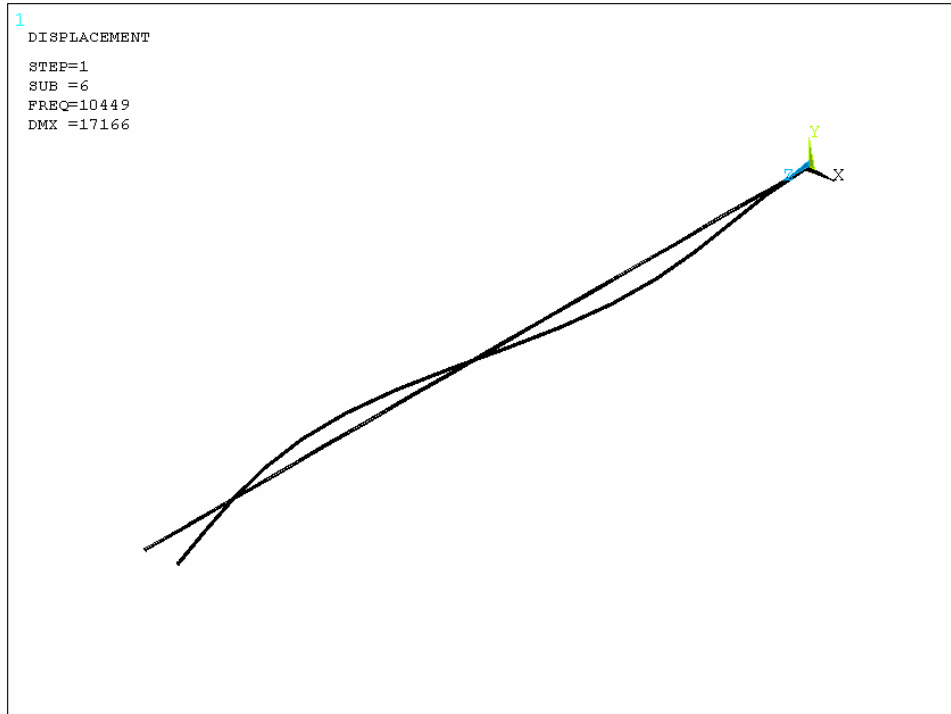
Şekil Ek D.3: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 3. frekans şekli



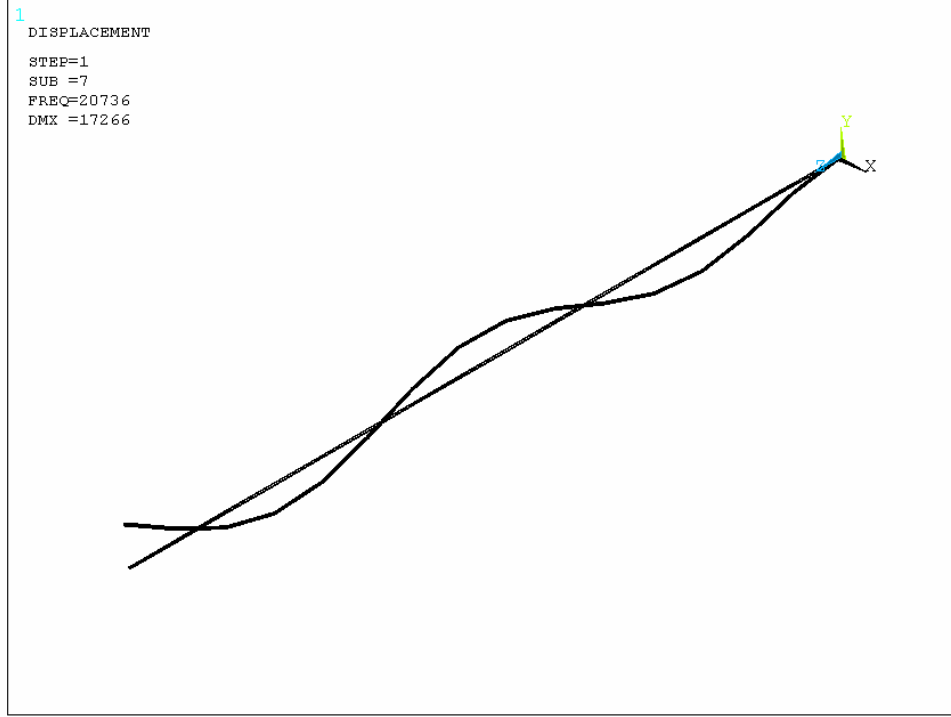
Şekil Ek D.4: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 4. frekans şekli



Şekil Ek D.5: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 5. frekans şekli



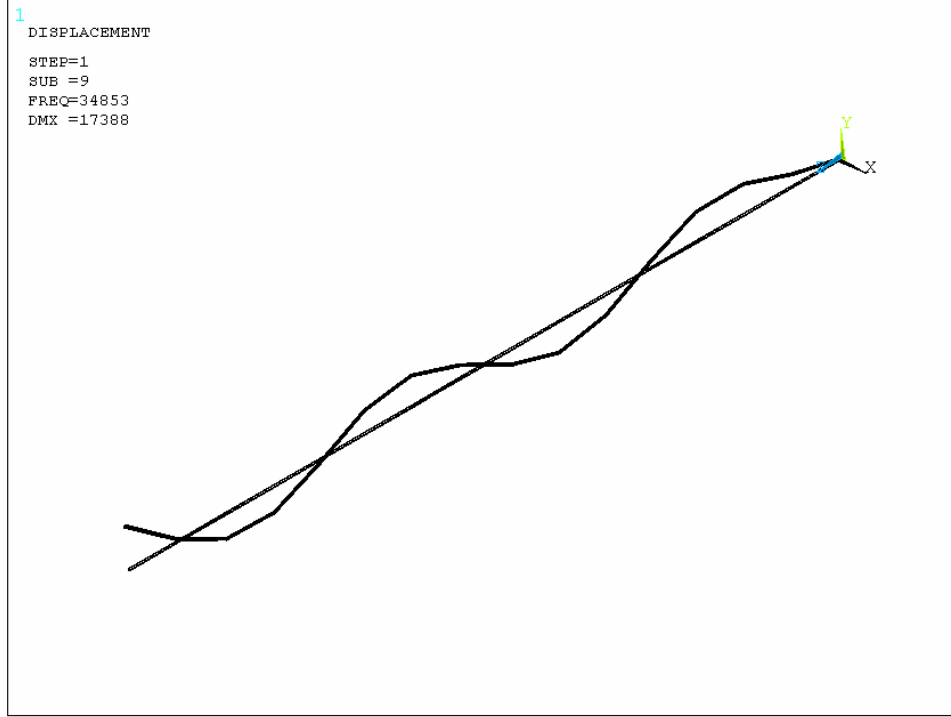
Şekil Ek D.6: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 6. frekans şekli



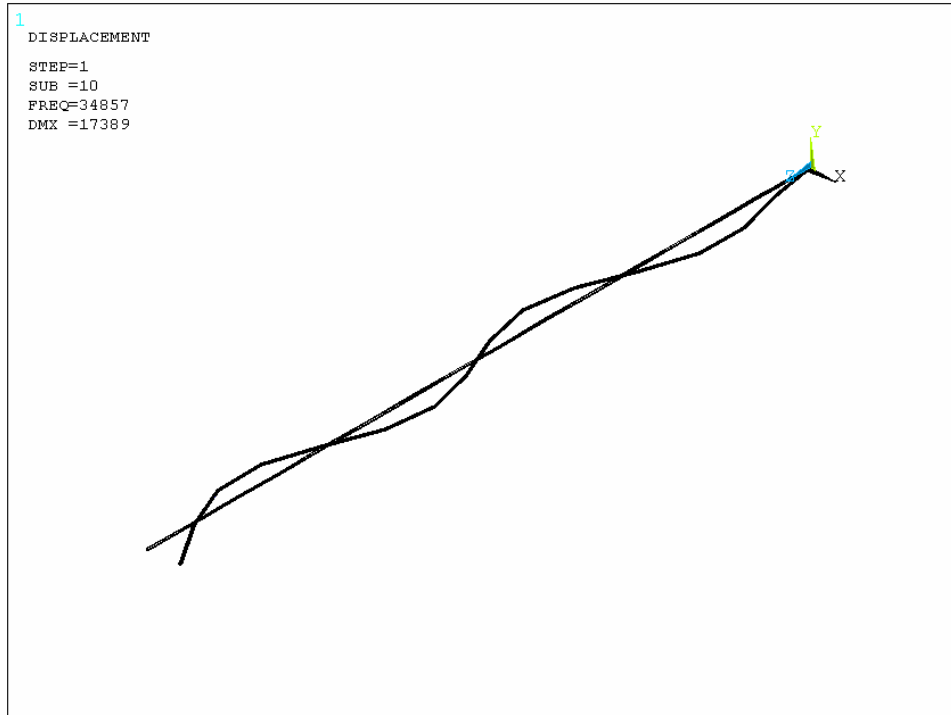
Şekil Ek D.7: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 7. frekans şekli



Şekil Ek D.8: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 8. frekans şekli

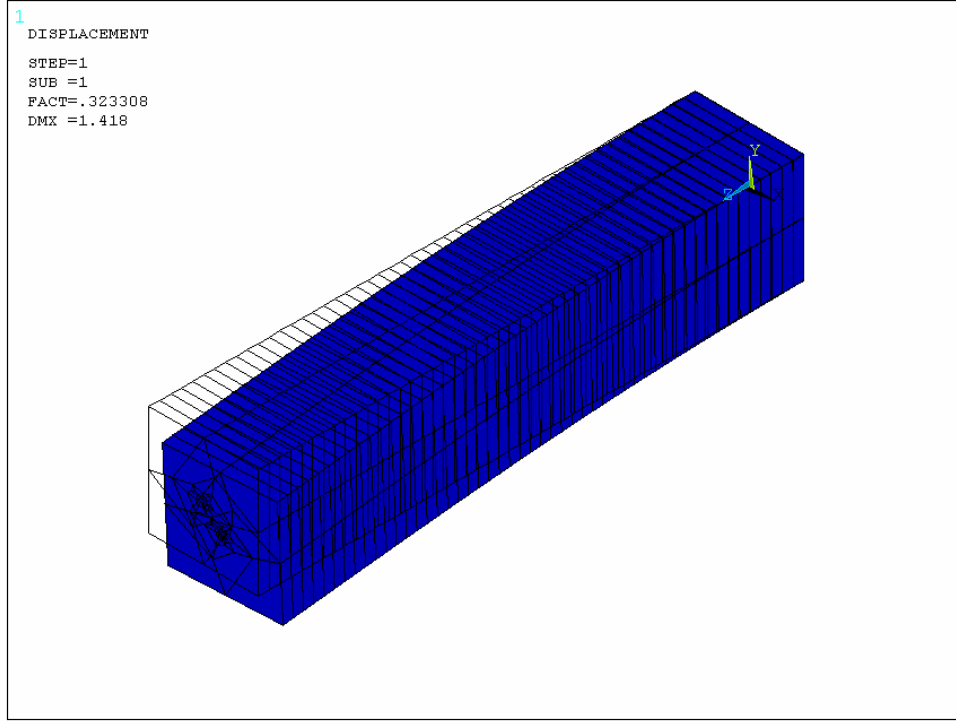


Şekil Ek D.9: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 9. frekans şekli

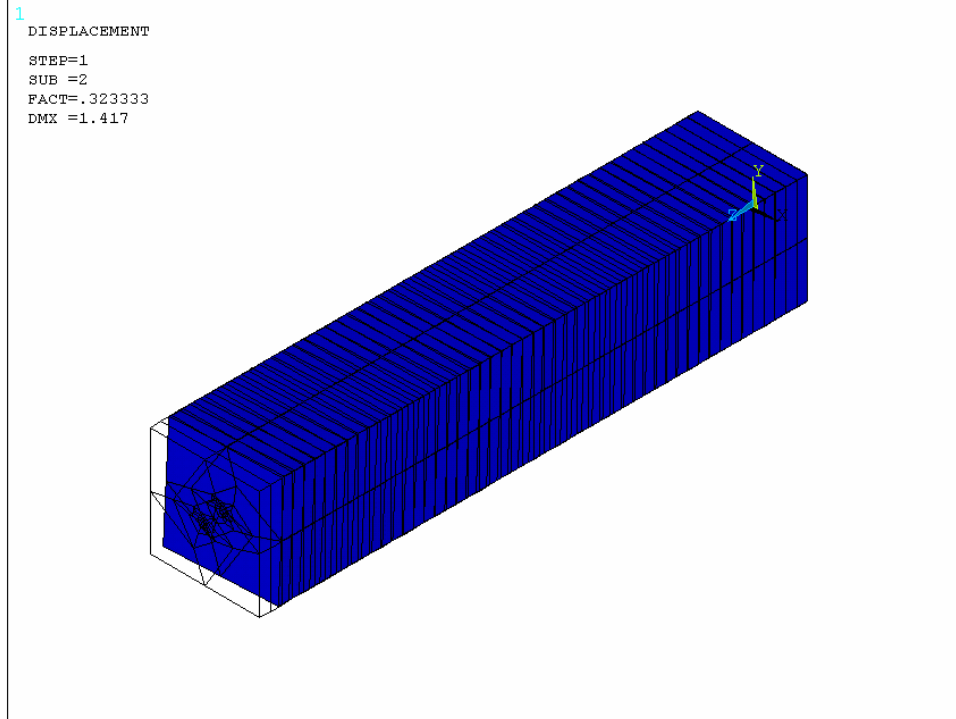


Şekil Ek D.10: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 10. frekans şekli

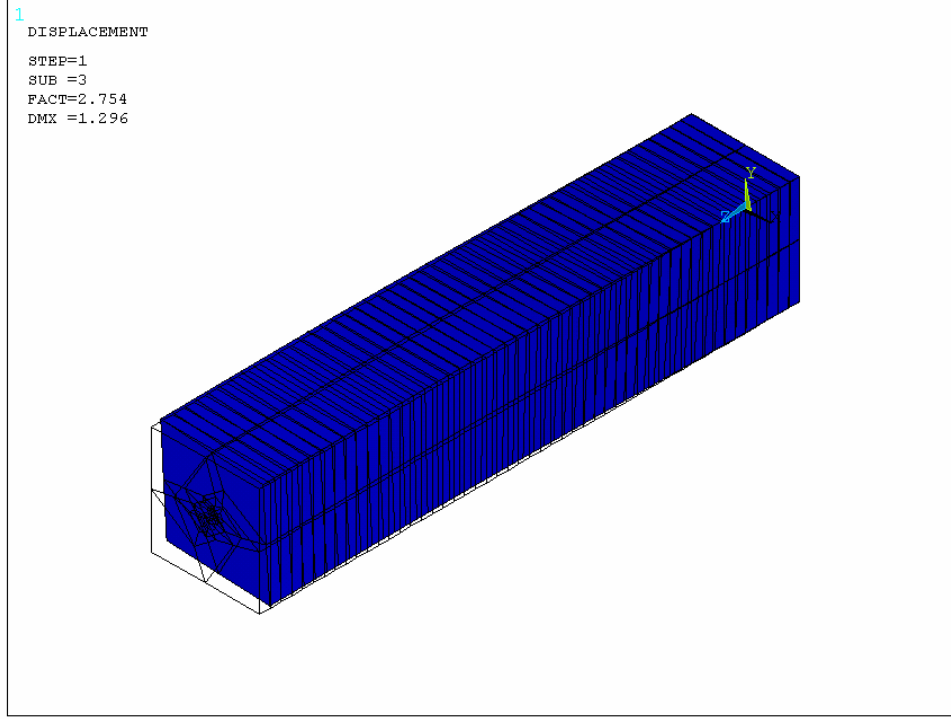
Ek E Sabit olmayan elyaf matris sistemi analizi mod şekilleri



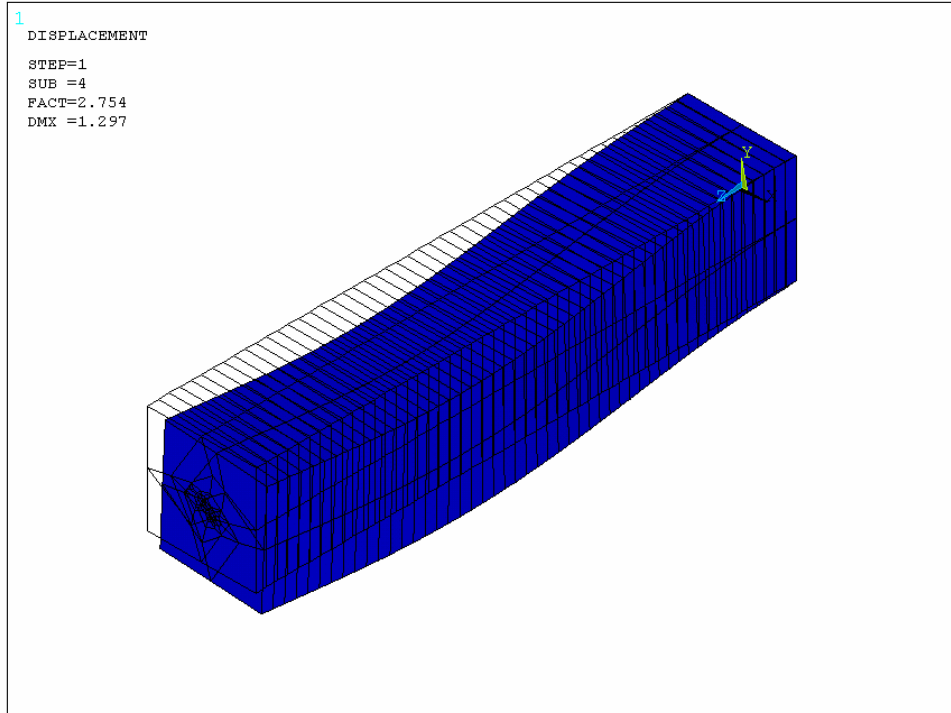
Şekil Ek E.1: Sabit olmayan elyaf matris sistemi analizi 1. mod şekli



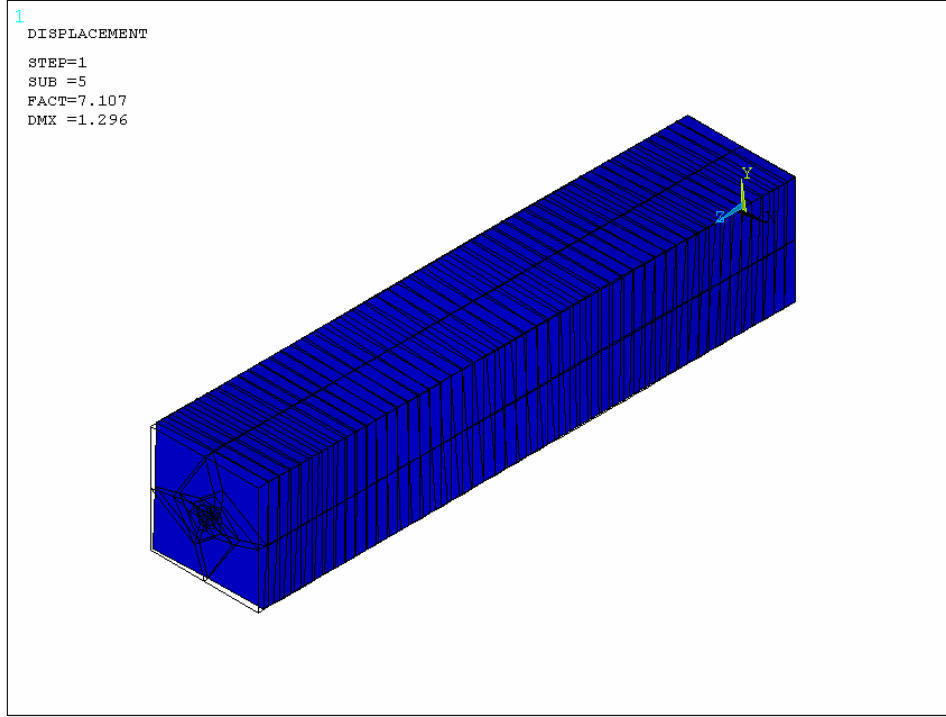
Şekil Ek E.2: Sabit olmayan elyaf matris sistemi analizi 2. mod şekli



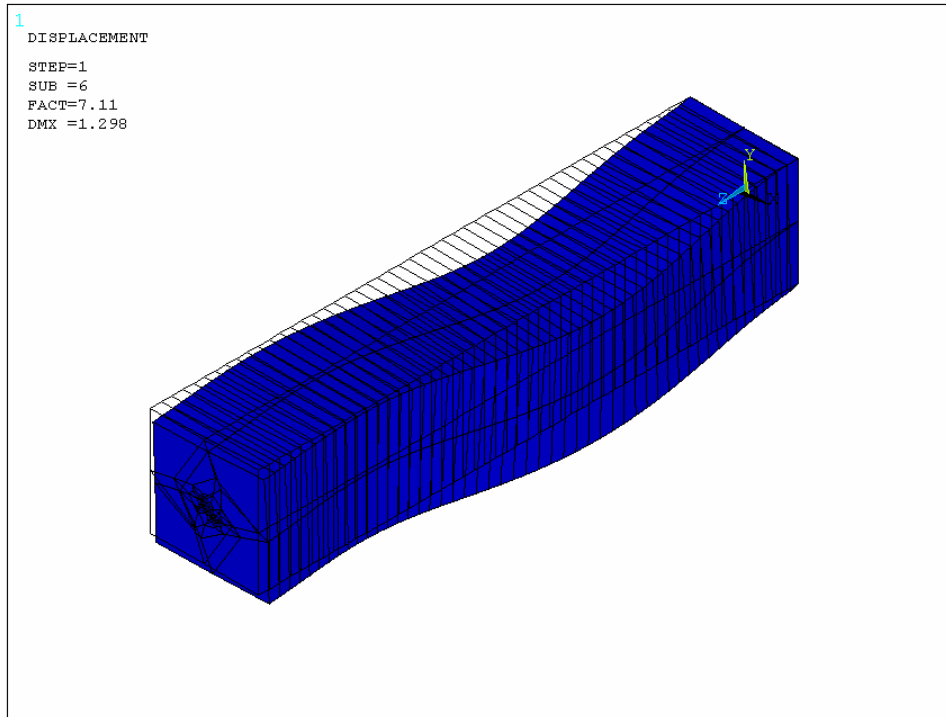
Şekil Ek E.3: Sabit olmayan elyaf matris sistemi analizi 3. mod şekli



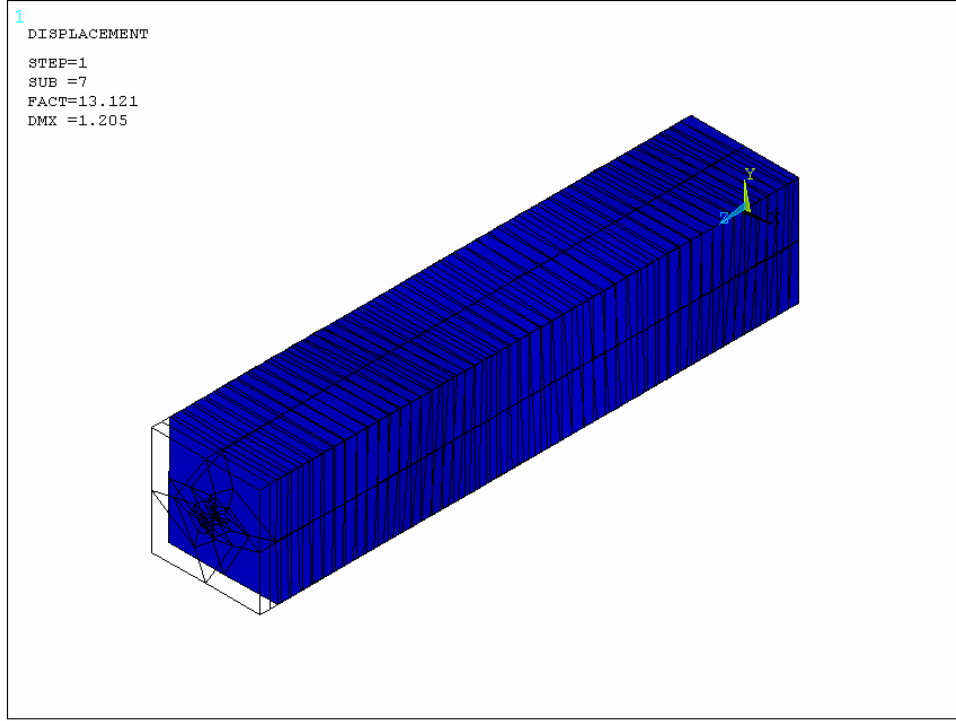
Şekil Ek E.4: Sabit olmayan elyaf matris sistemi analizi 4. mod şekli



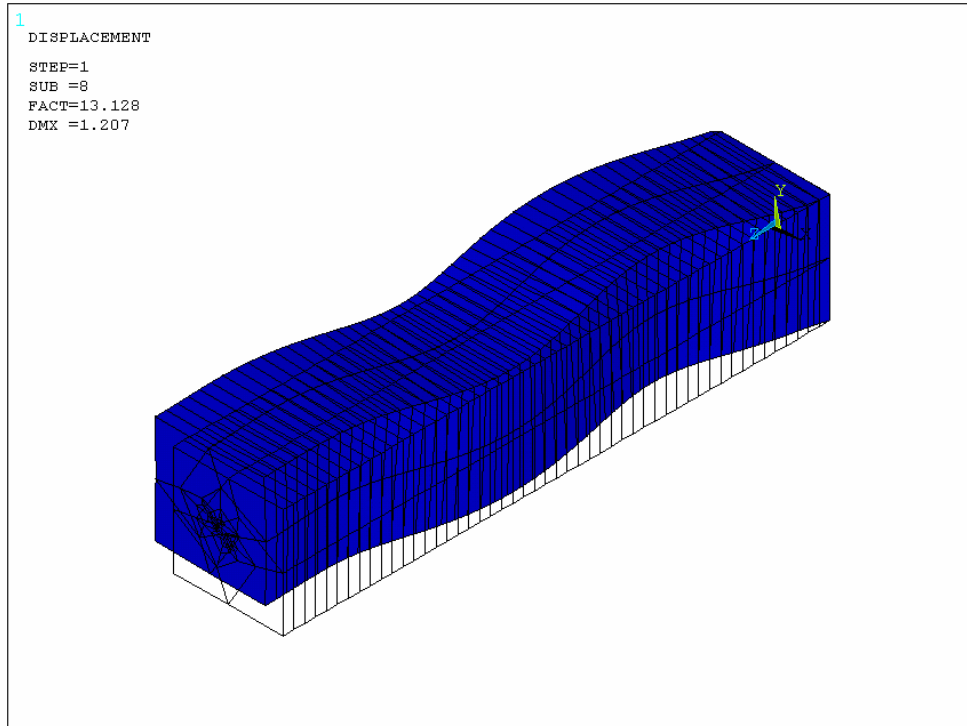
Şekil Ek E.5: Sabit olmayan elyaf matris sistemi analizi 5. mod şekli



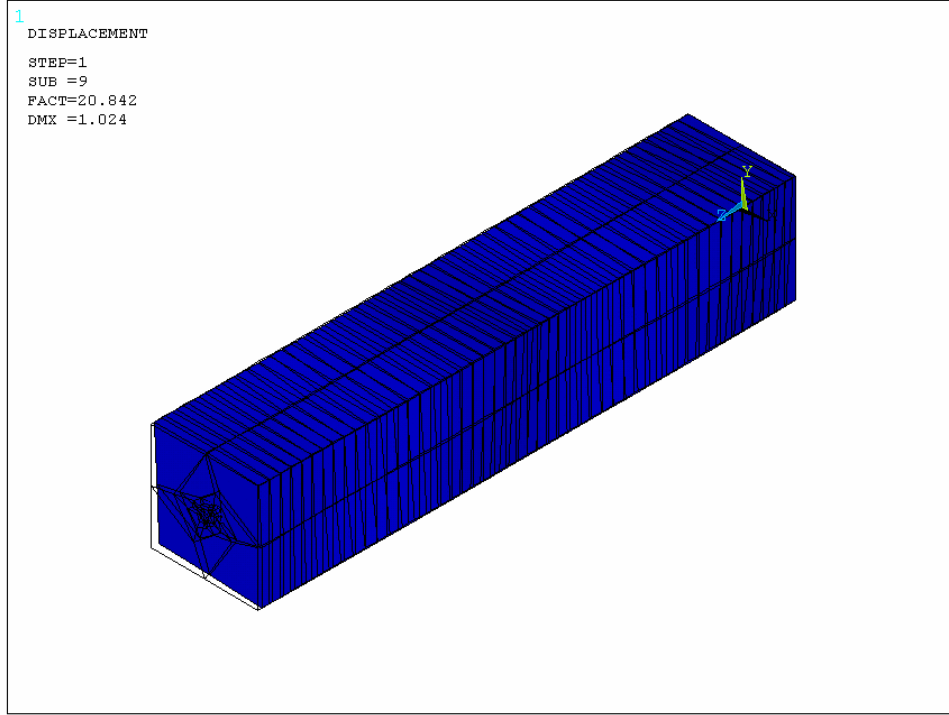
Şekil Ek E.6: Sabit olmayan elyaf matris sistemi analizi 6. mod şekli



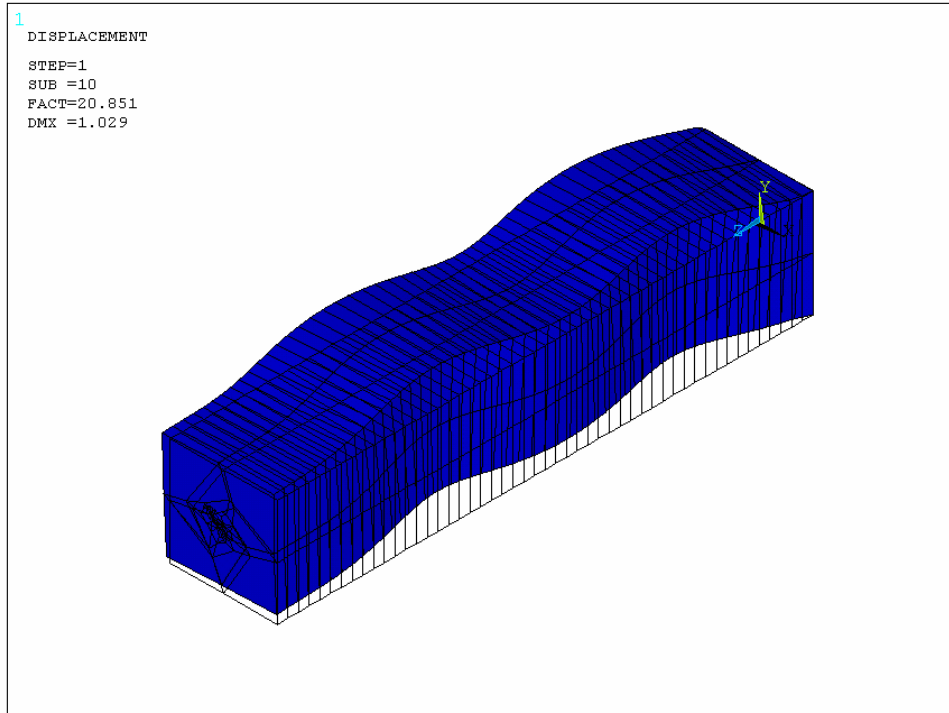
Şekil Ek E.7: Sabit olmayan elyaf matris sistemi analizi 7. mod şekli



Şekil Ek E.8: Sabit olmayan elyaf matris sistemi analizi 8. mod şekli

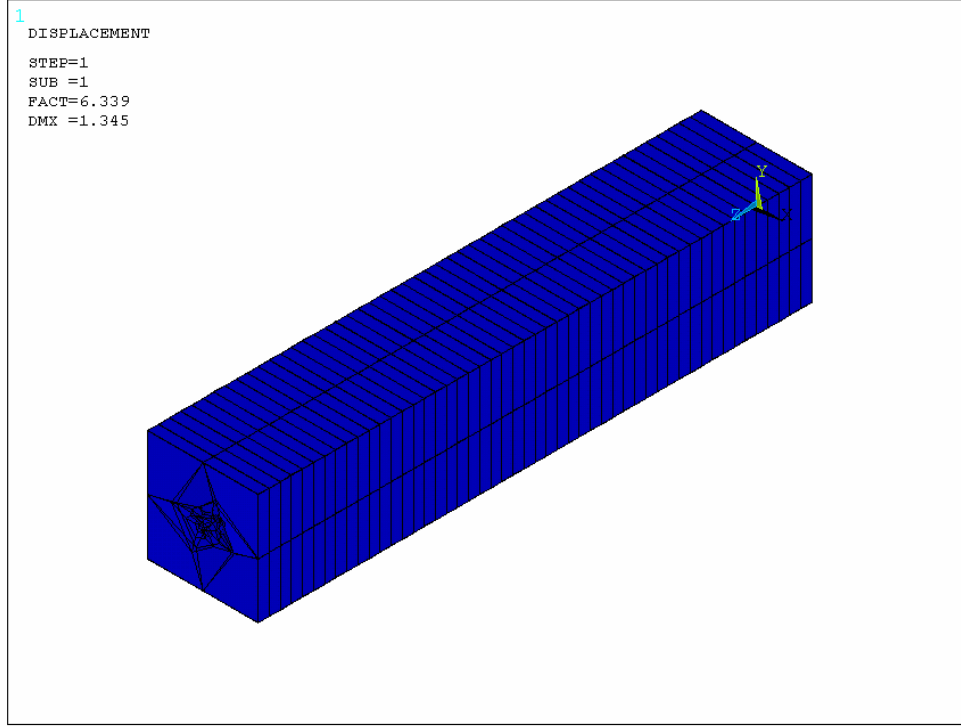


Şekil Ek E.9: Sabit olmayan elyaf matris sistemi analizi 9. mod şekli

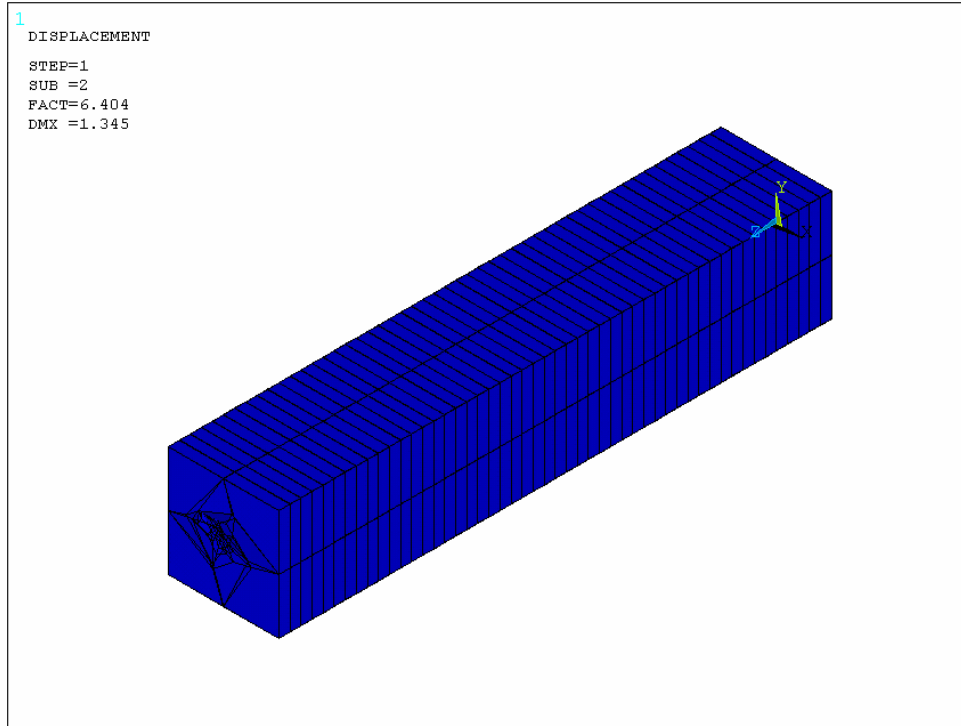


Şekil Ek E.10: Sabit olmayan elyaf matris sistemi analizi 10. mod şekli

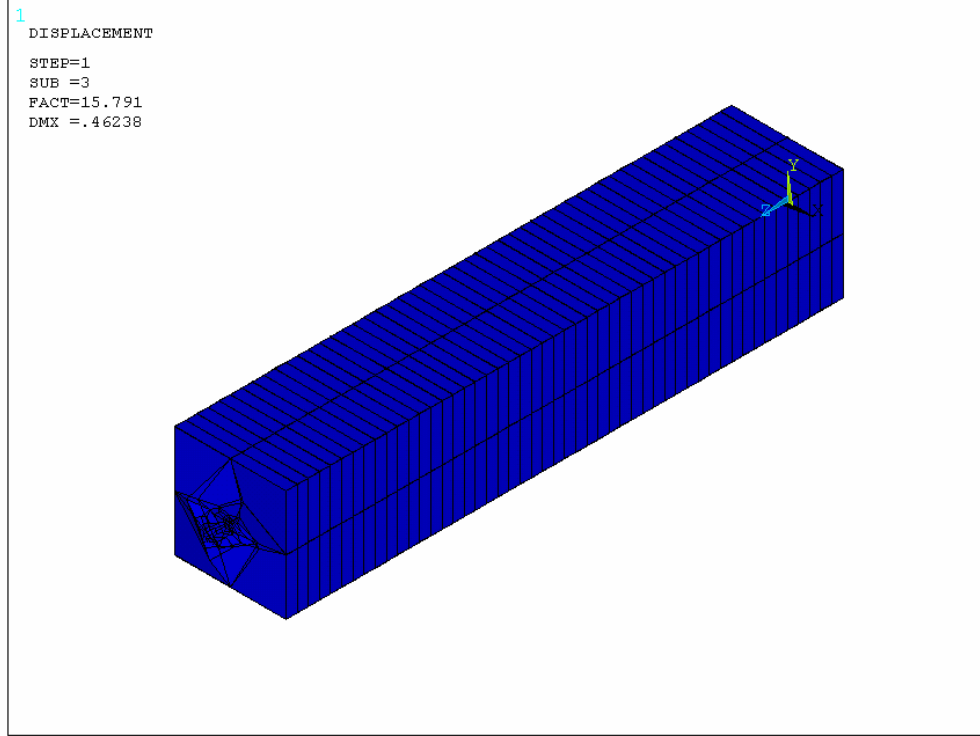
Ek F- Sabitelyaf matris sistemi analizi mod şekilleri



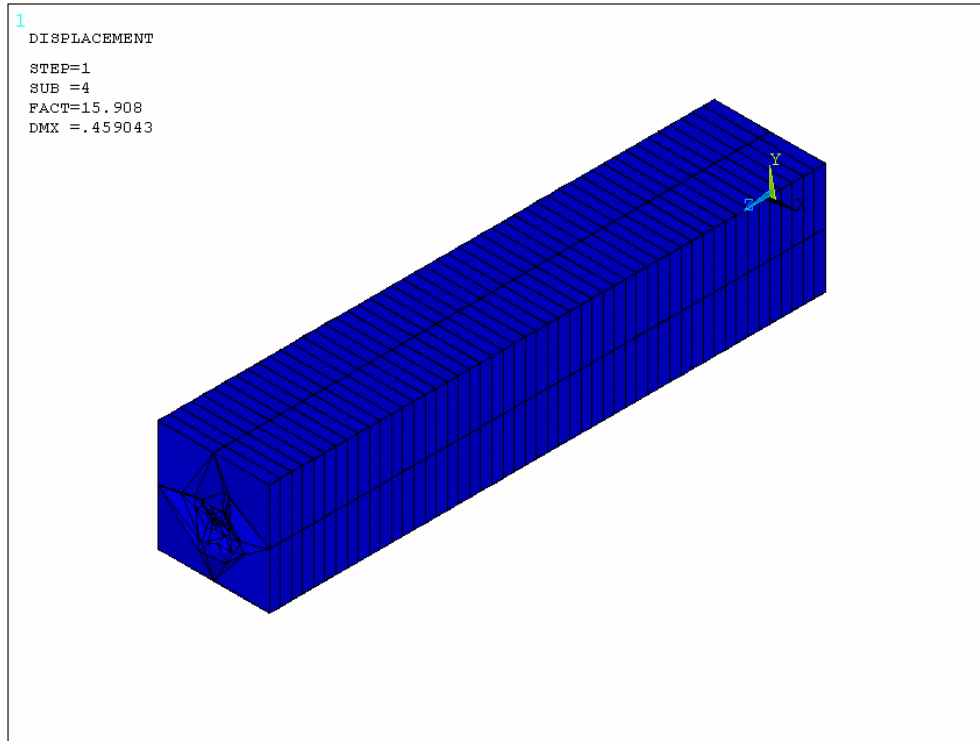
Şekil Ek F.1: Sabit elyaf matris sistemi analizi 1. mod şekli



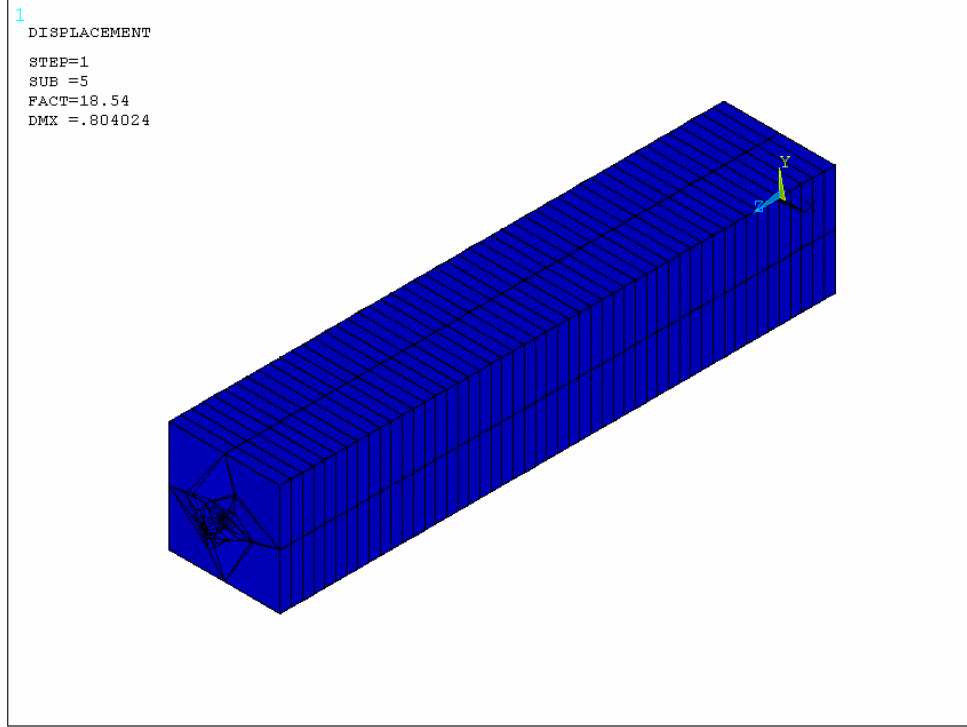
Şekil Ek F.2: Sabit elyaf matris sistemi analizi 2. mod şekli



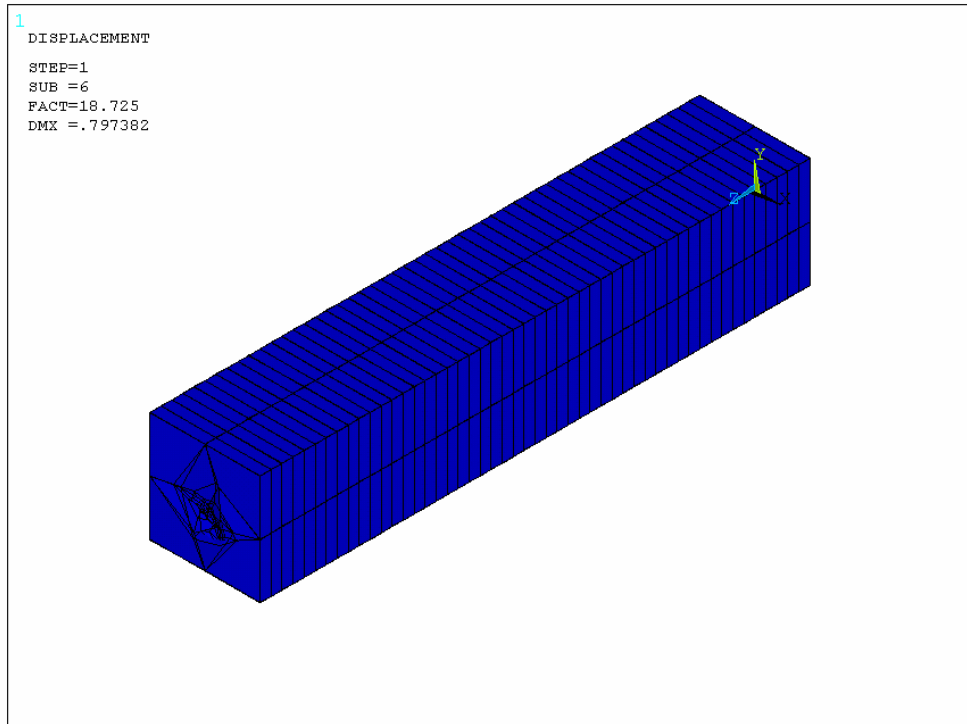
Şekil Ek F.3: Sabit elyaf matris sistemi analizi 3. mod şekli



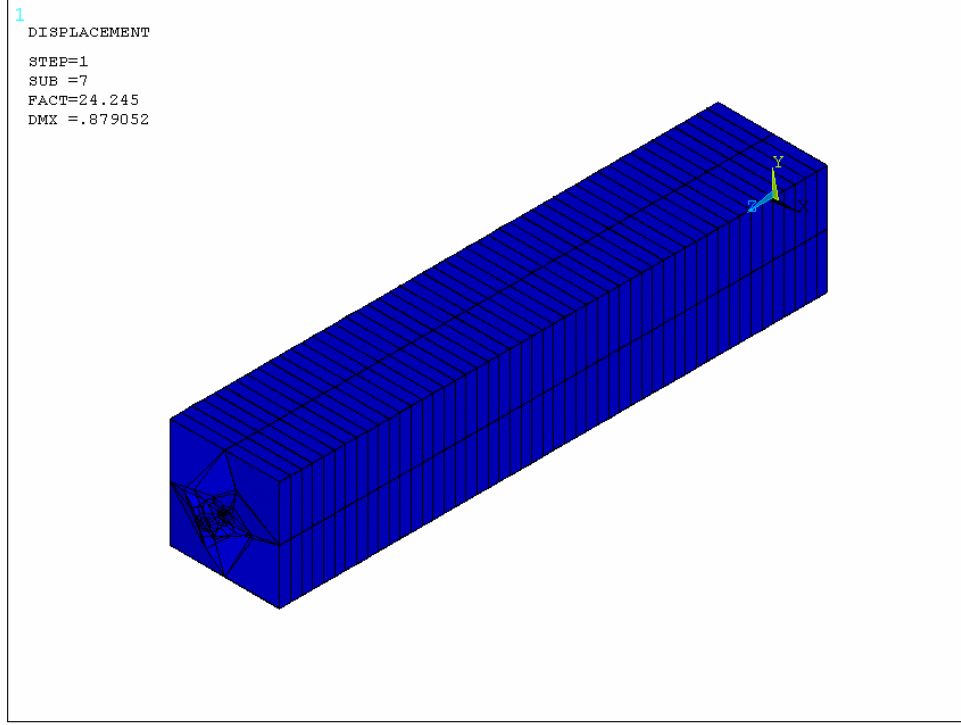
Şekil Ek F.4: Sabit elyaf matris sistemi analizi 4. mod şekli



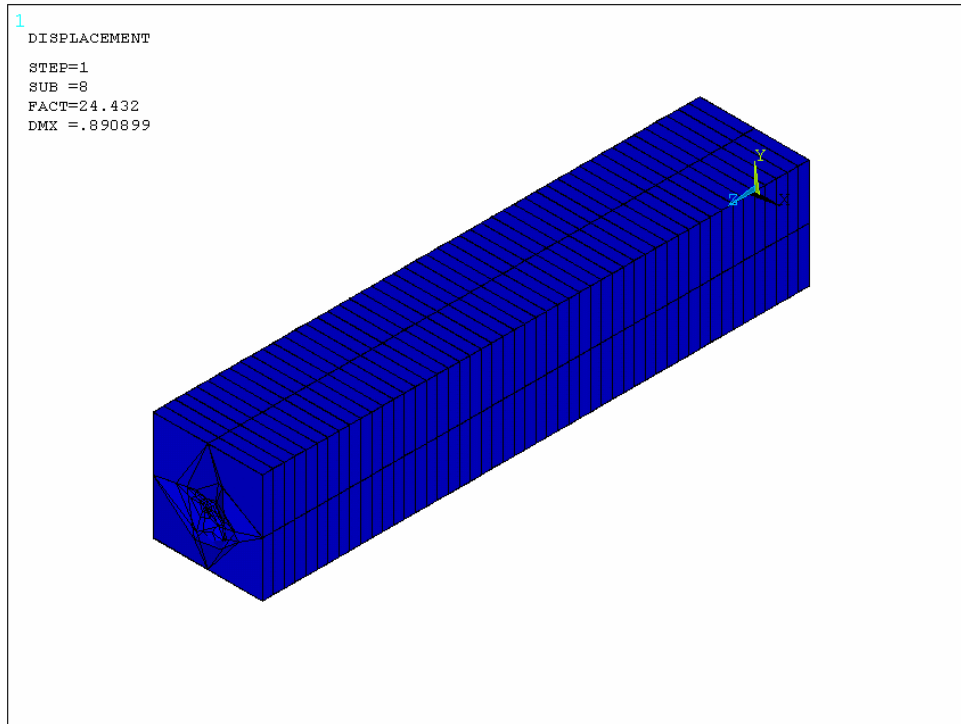
Şekil Ek F.5: Sabit elyaf matris sistemi analizi 5. mod şekli



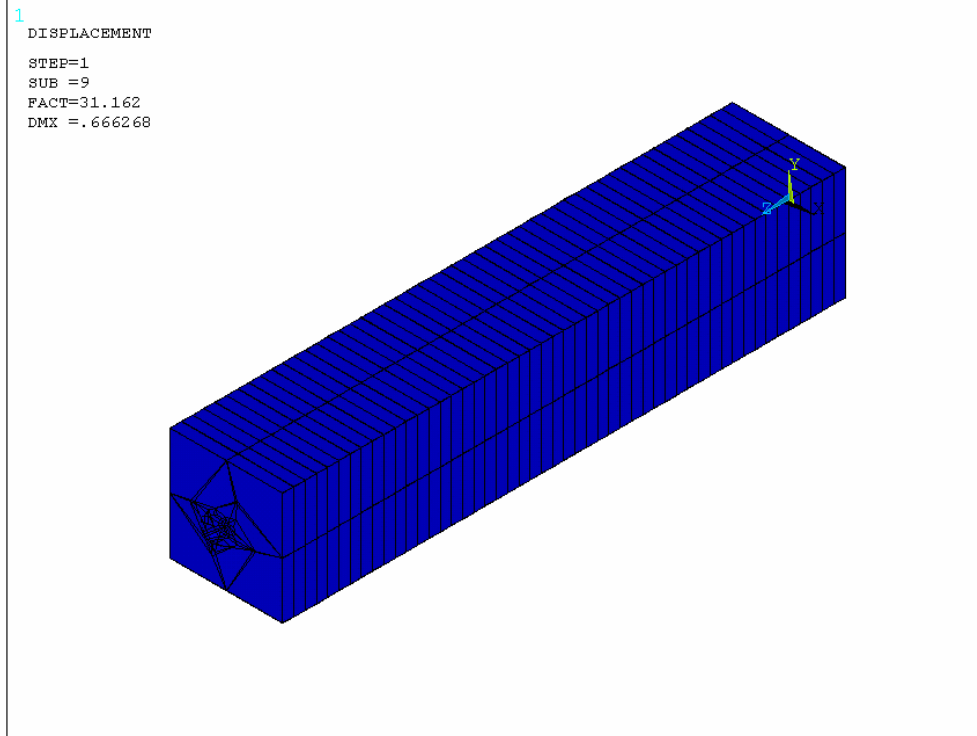
Şekil Ek F.6: Sabit elyaf matris sistemi analizi 6. mod şekli



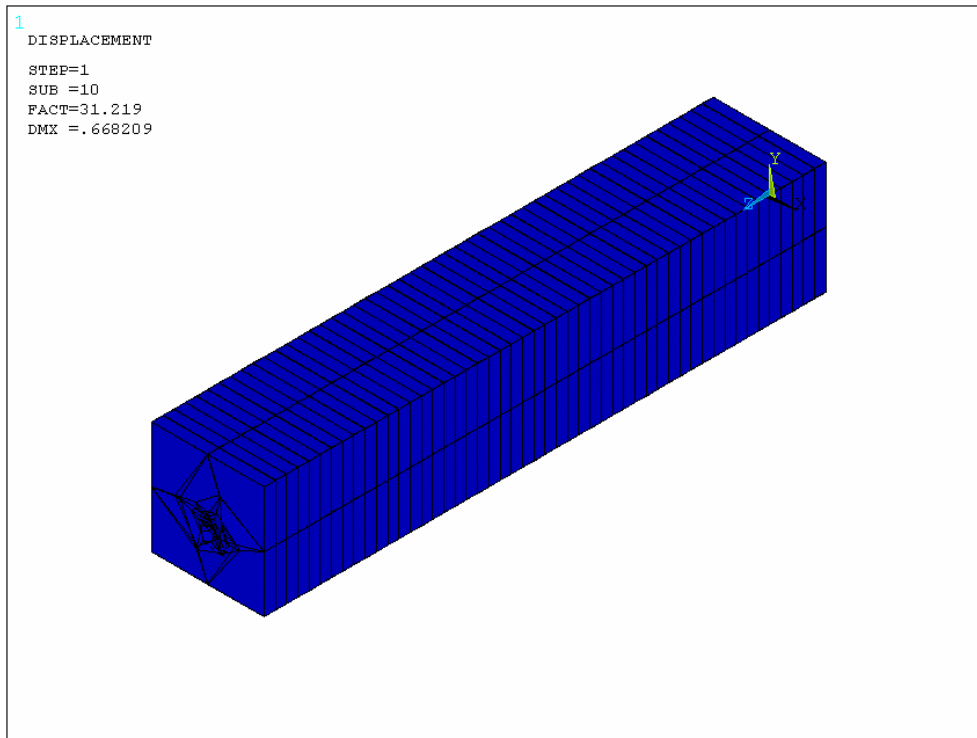
Şekil Ek F.7: Sabit elyaf matris sistemi analizi 7. mod şekli



Şekil Ek F.8: Sabit elyaf matris sistemi analizi 8. mod şekli

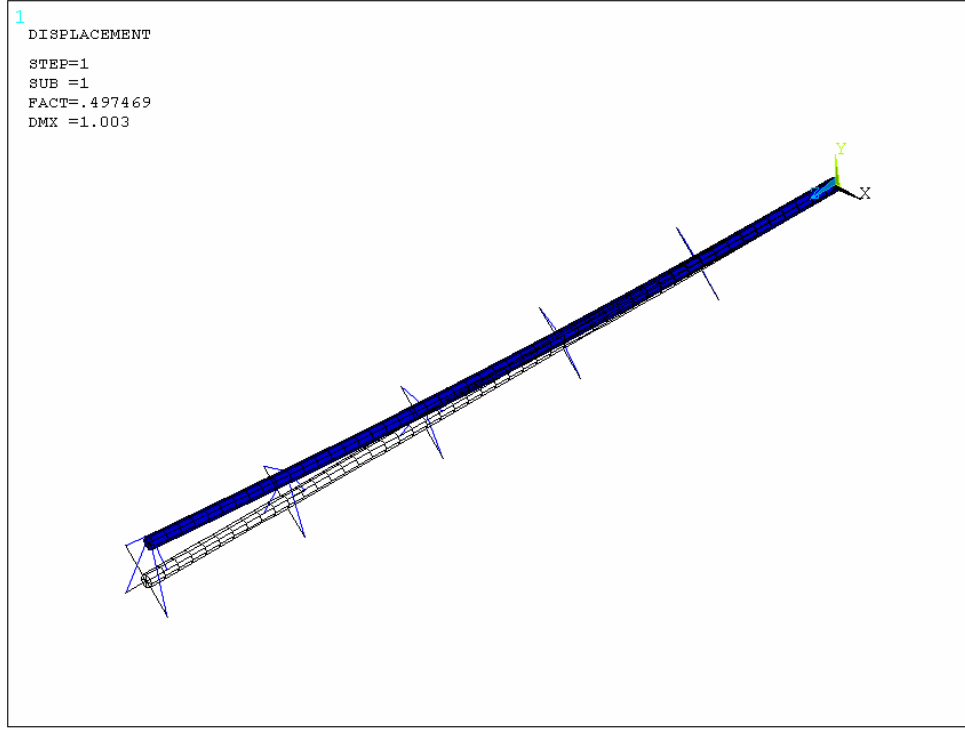


Şekil Ek F.9: Sabit elyaf matris sistemi analizi 9. mod şekli

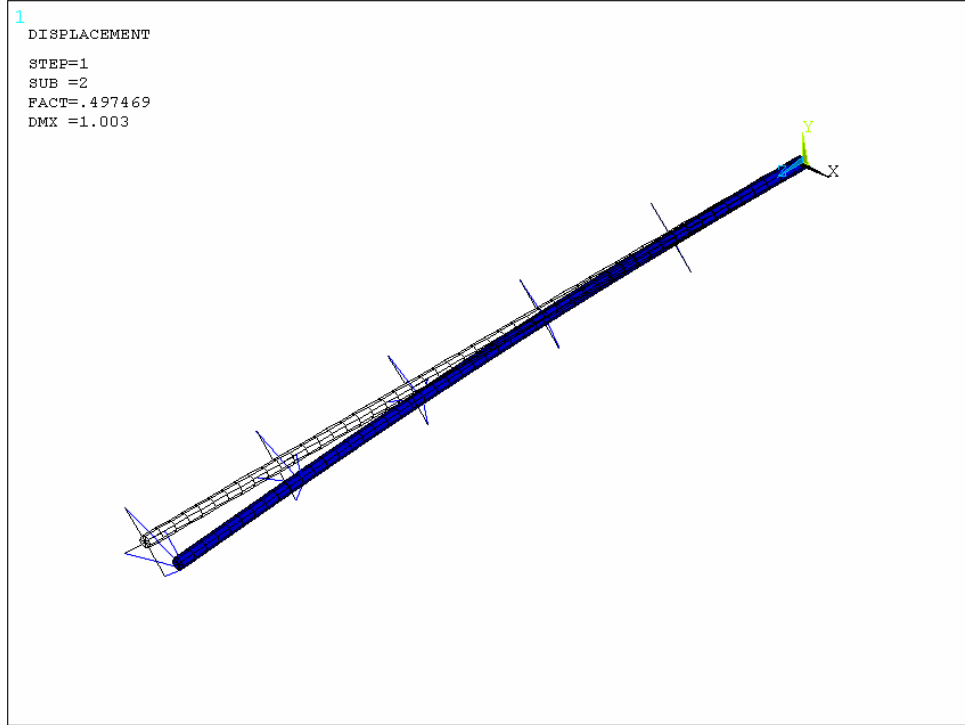


Şekil Ek F.10: Sabit elyaf matris sistemi analizi 10. mod şekli

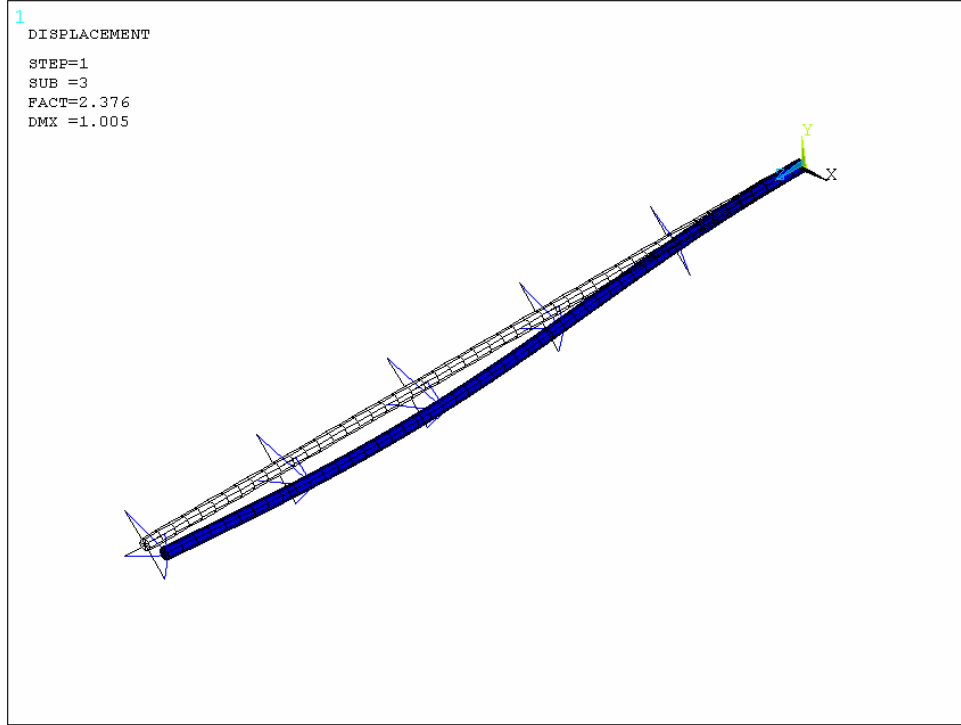
Ek G Elyaf-yay sistemi analizi mod şekilleri



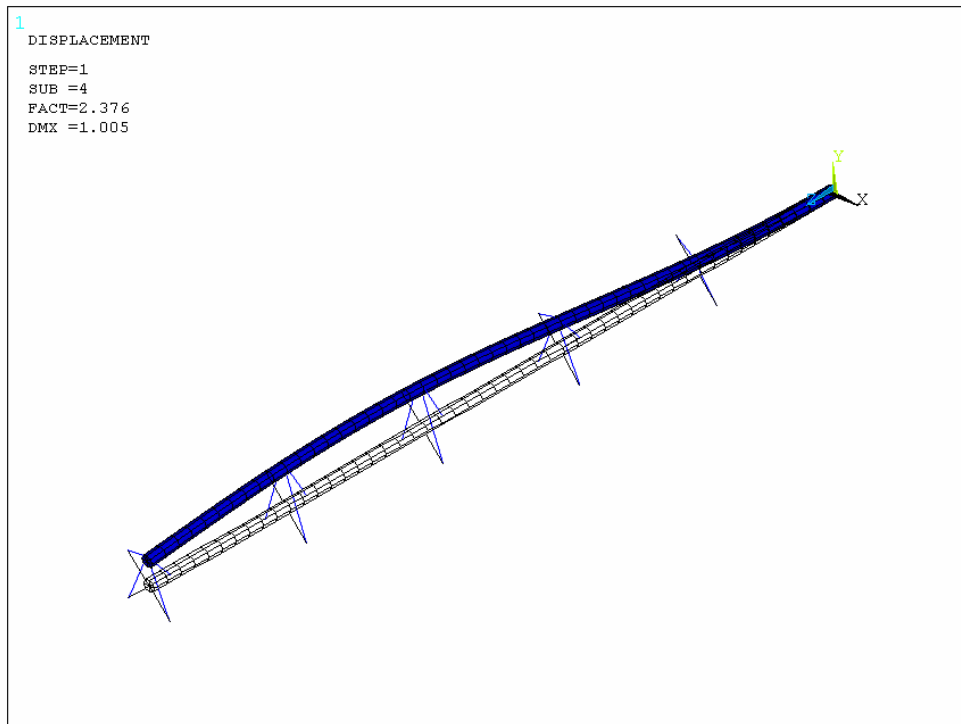
Şekil Ek G.1: Elyaf-yay sistemi analizi 1. mod şekli



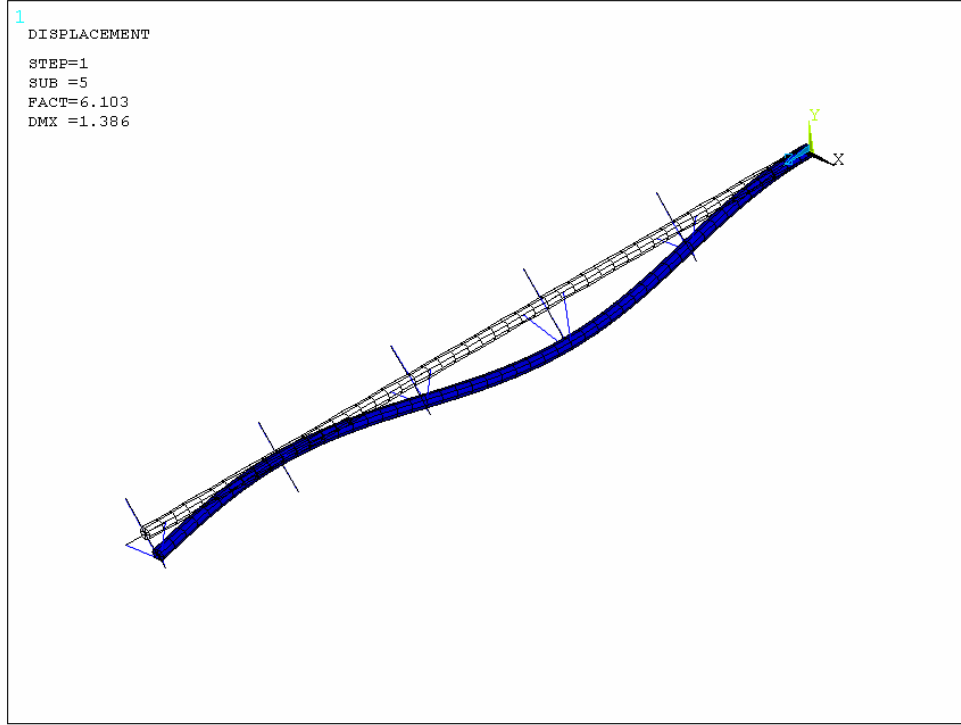
Şekil Ek G.2: Elyaf-yay sistemi analizi 2. mod şekli



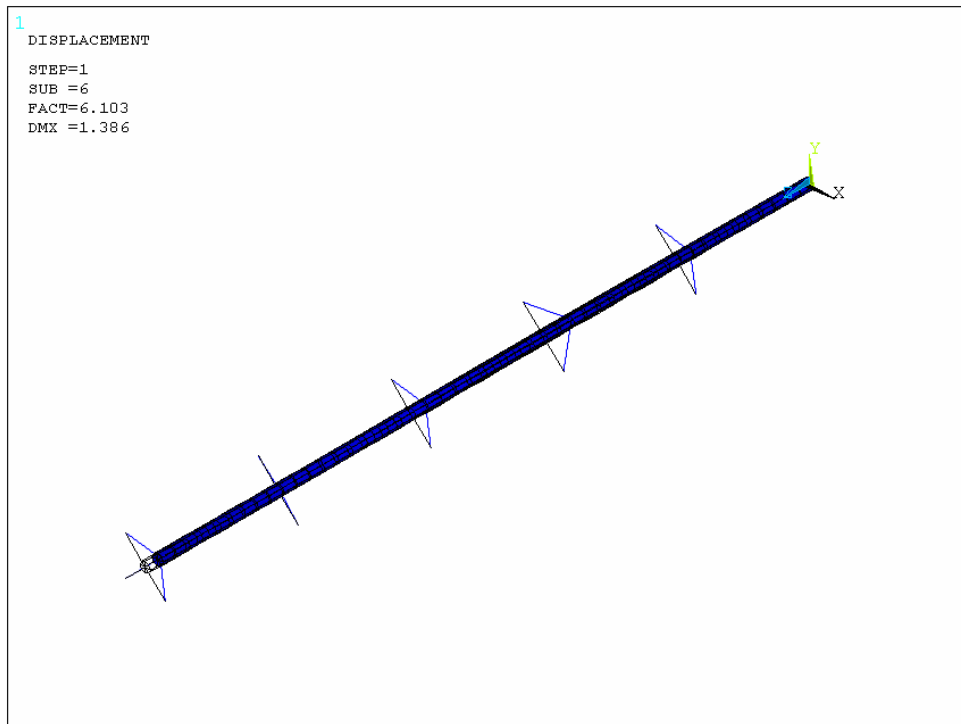
Şekil Ek G.3: Elyaf-yay sistemi analizi 3. mod şekli



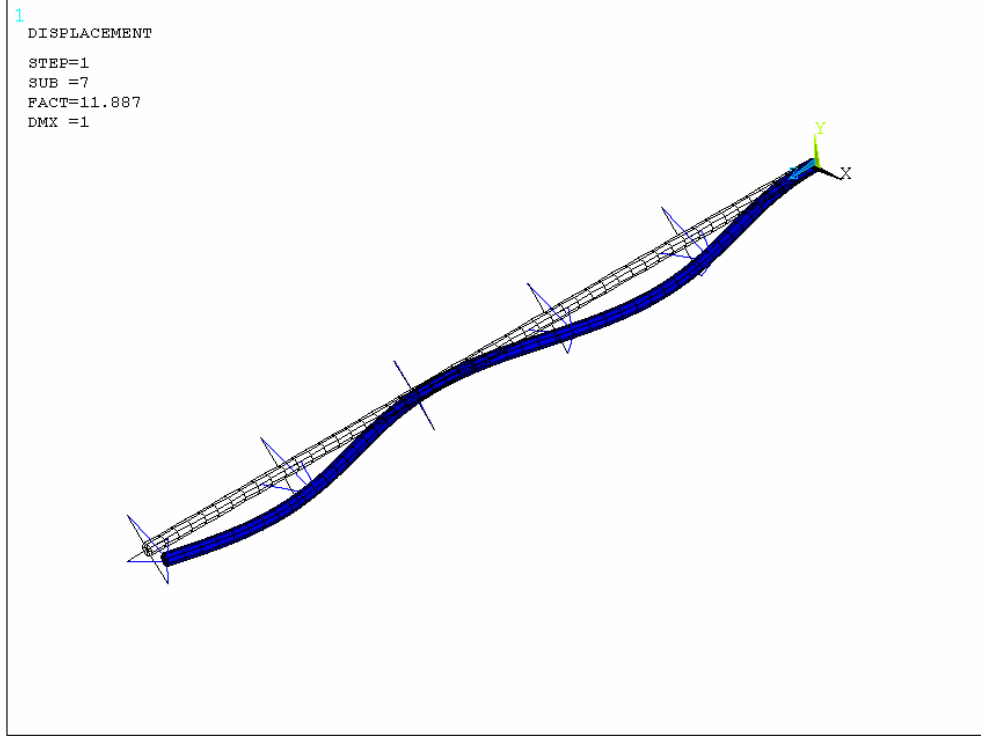
Şekil Ek G.4: Elyaf-yay sistemi analizi 4. mod şekli



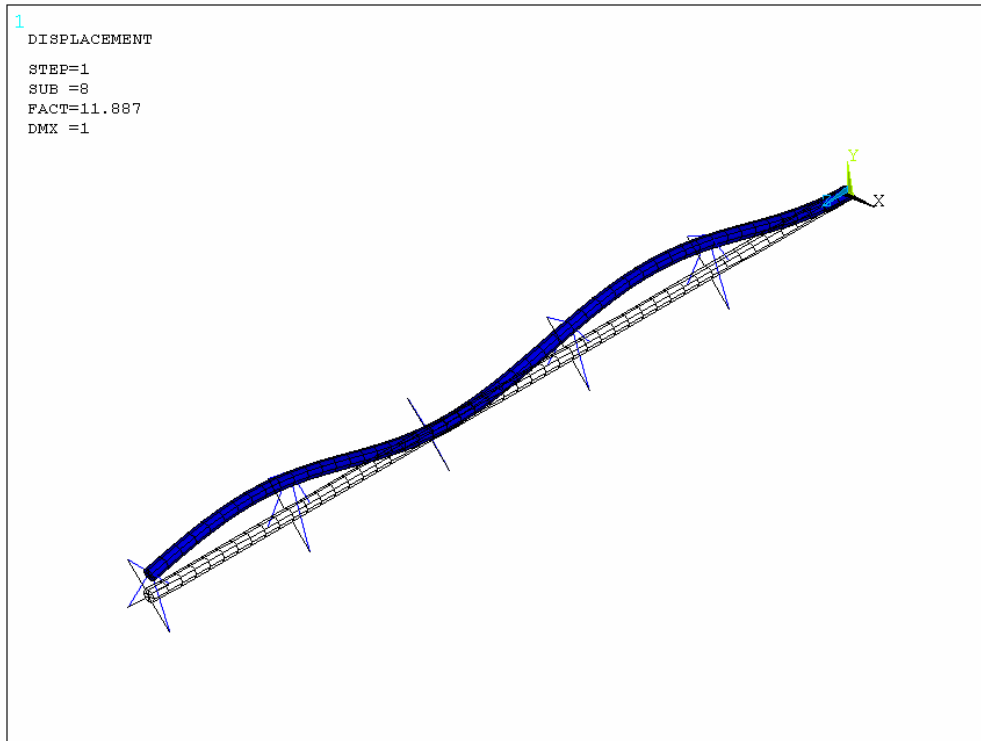
Şekil Ek G.5: Elyaf-yay sistemi analizi 5. mod şekli



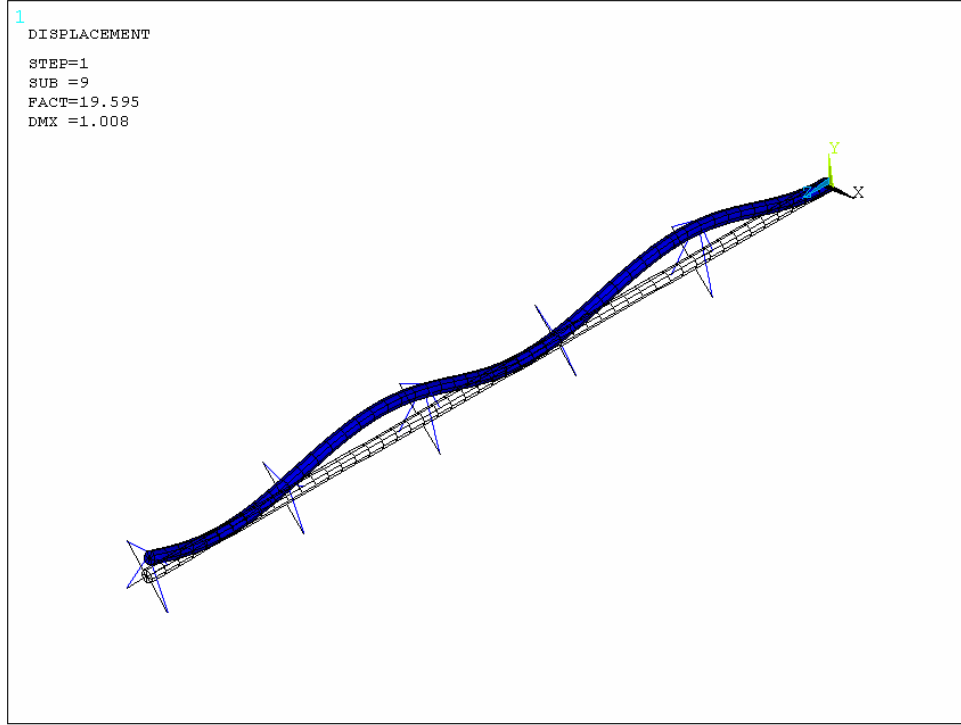
Şekil Ek G.6: Elyaf-yay sistemi analizi 6. mod şekli



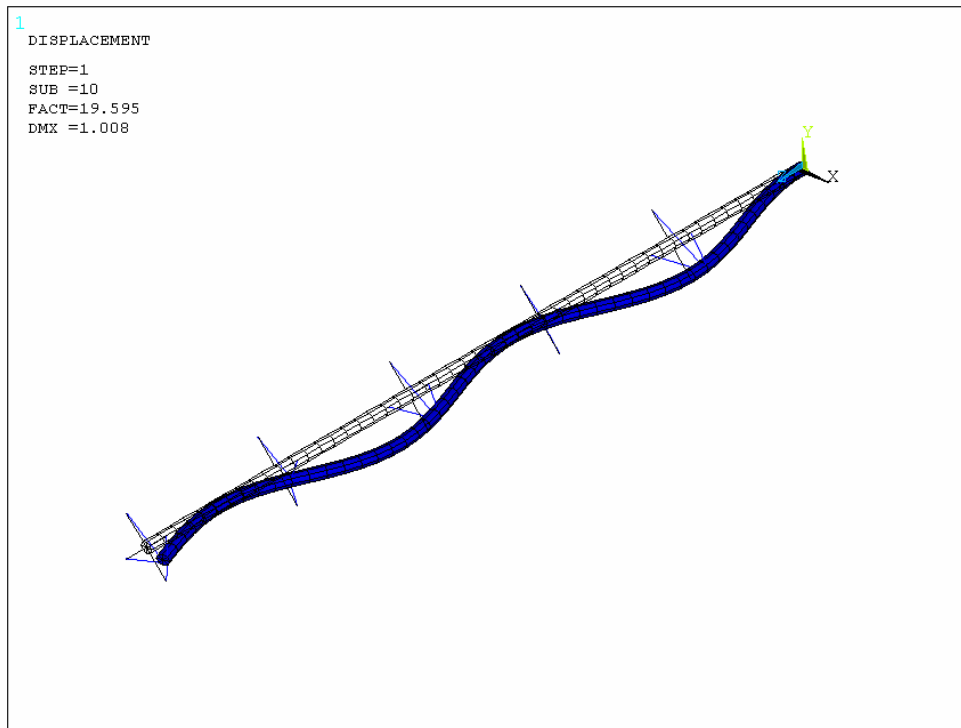
Şekil Ek G.7: Elyaf-yay sistemi analizi 7. mod şekli



Şekil Ek G.8: Elyaf-yay sistemi analizi 8. mod şekli

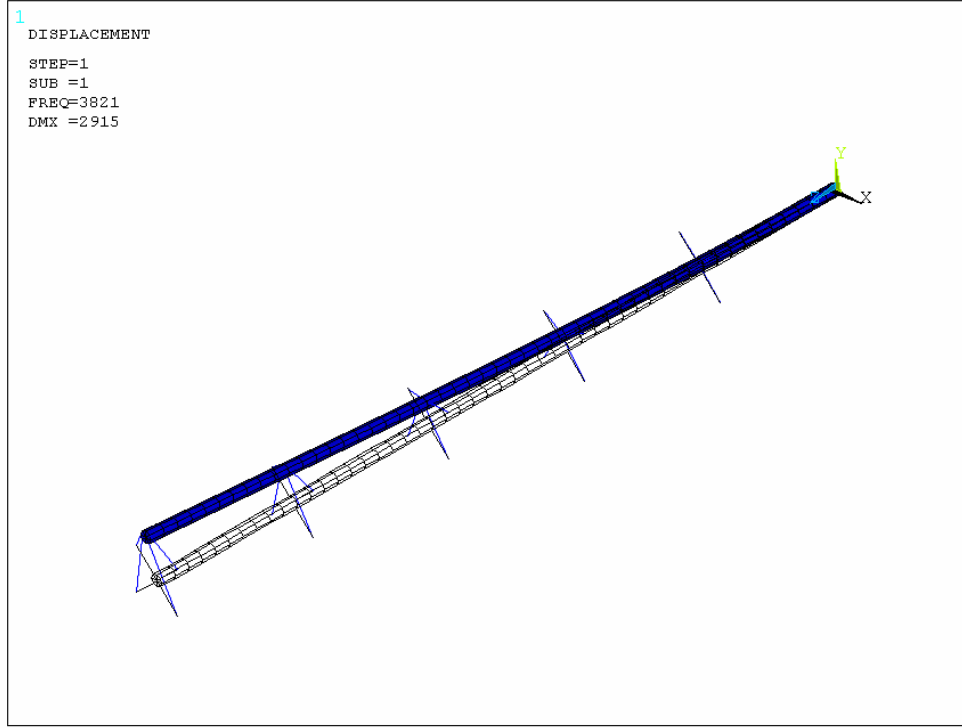


Şekil Ek G.9: Elyaf-yay sistemi analizi 9. mod şekli

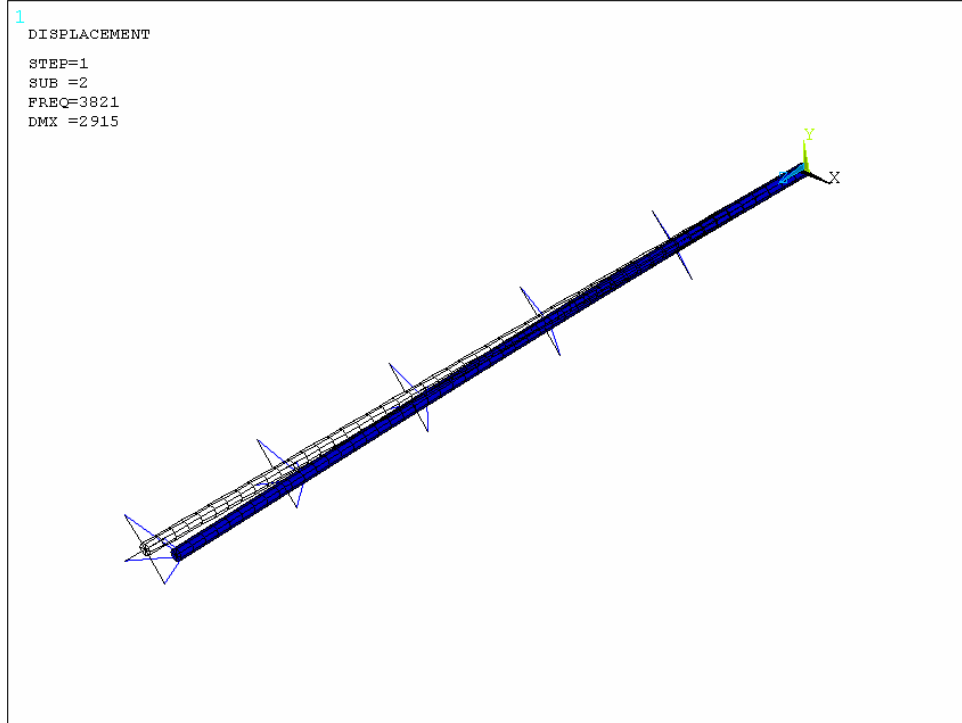


Şekil Ek G.10: Elyaf-yay sistemi analizi 10. mod şekli

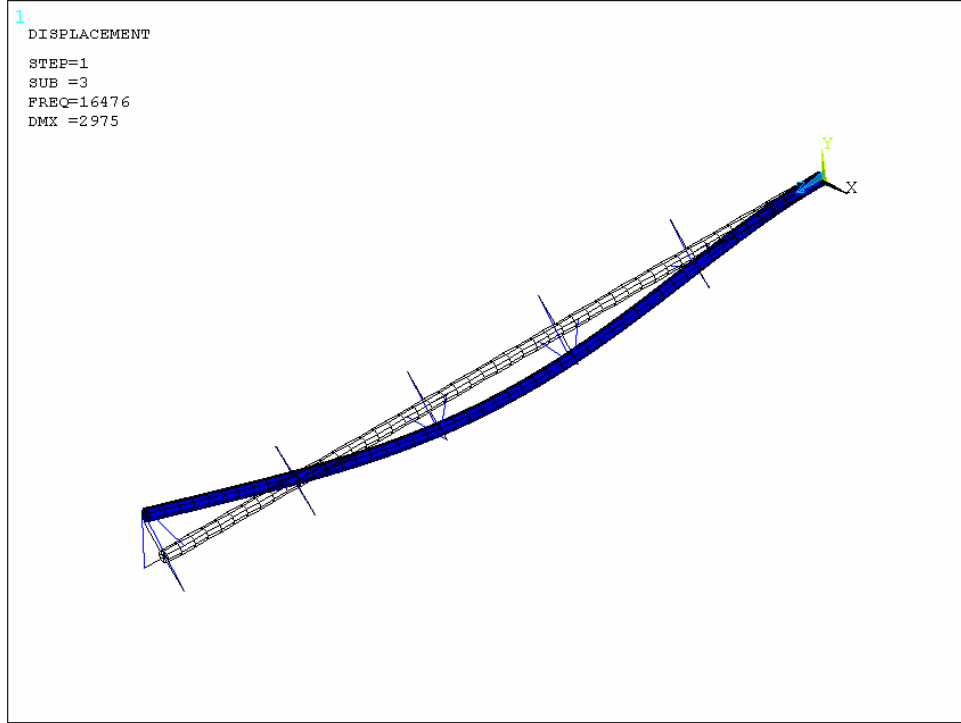
Ek H Elyaf-yay sistemi serbest titreşim analizi frekans şekilleri



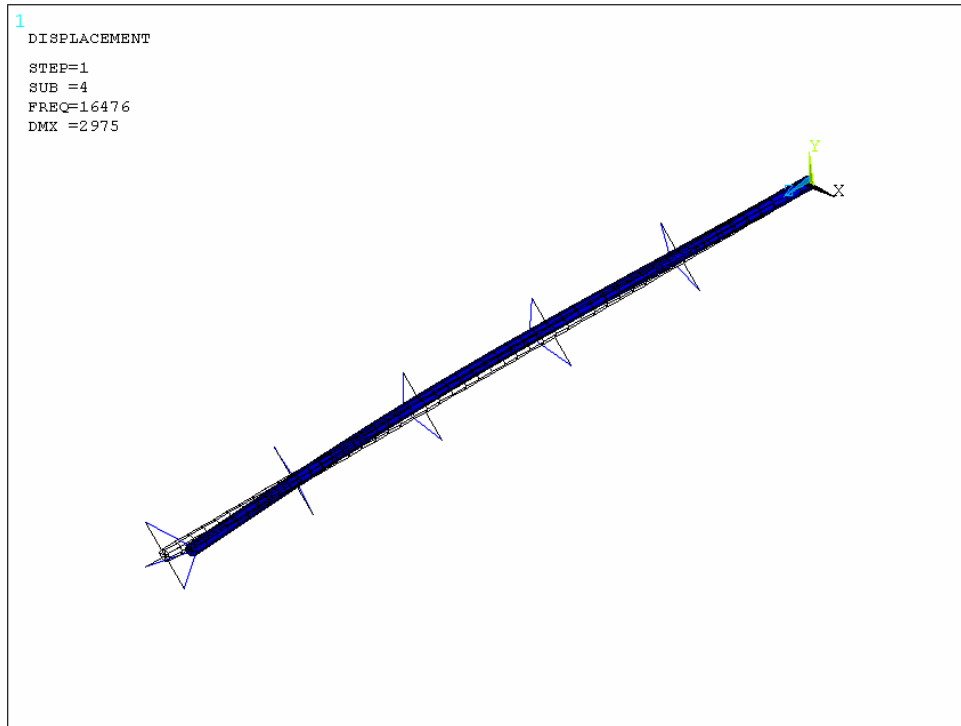
Şekil Ek H.1: Elyaf-yay sistemi serbest titreşim analizi 1. frekans şekli



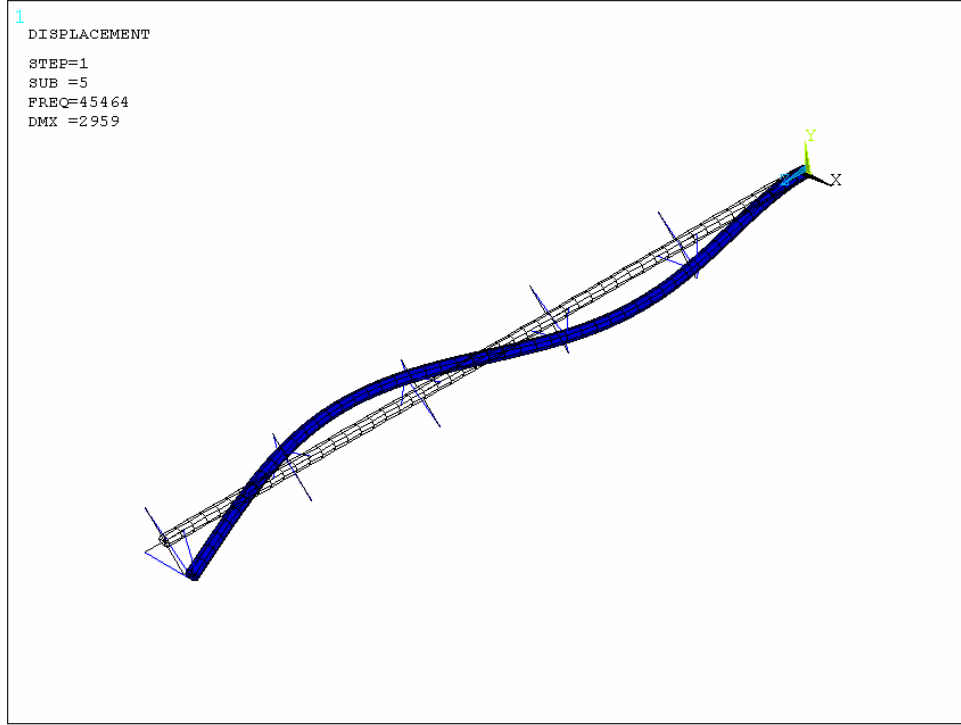
Şekil Ek H.2: Elyaf-yay sistemi serbest titreşim analizi 2. frekans şekli



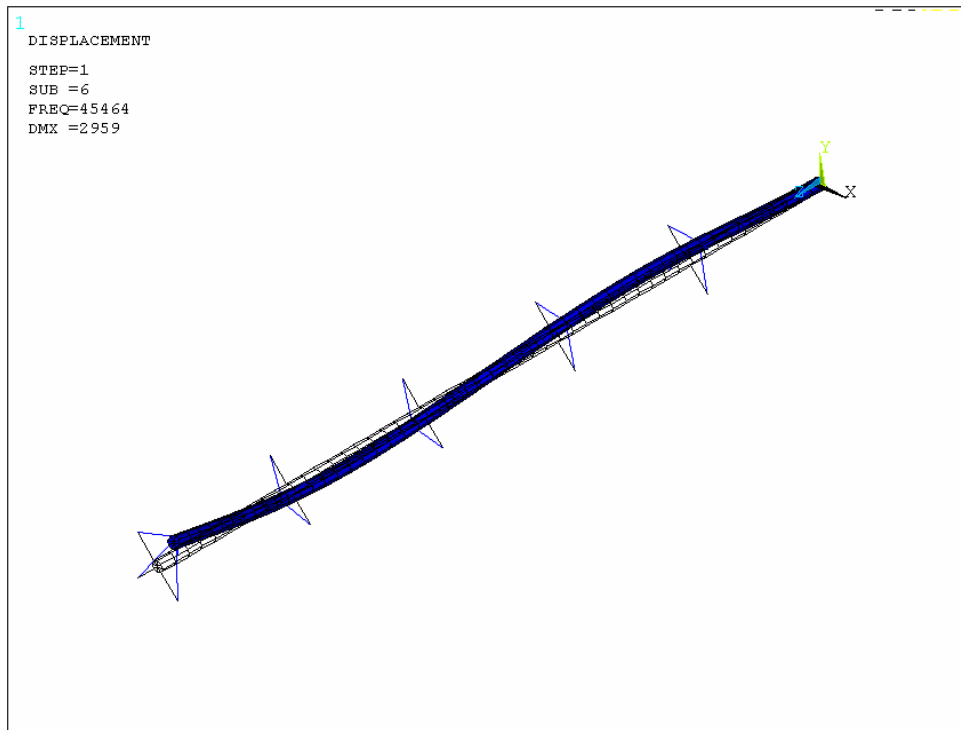
Şekil Ek H.3: Elyaf-yay sistemi serbest titreşim analizi 3. frekans şekli



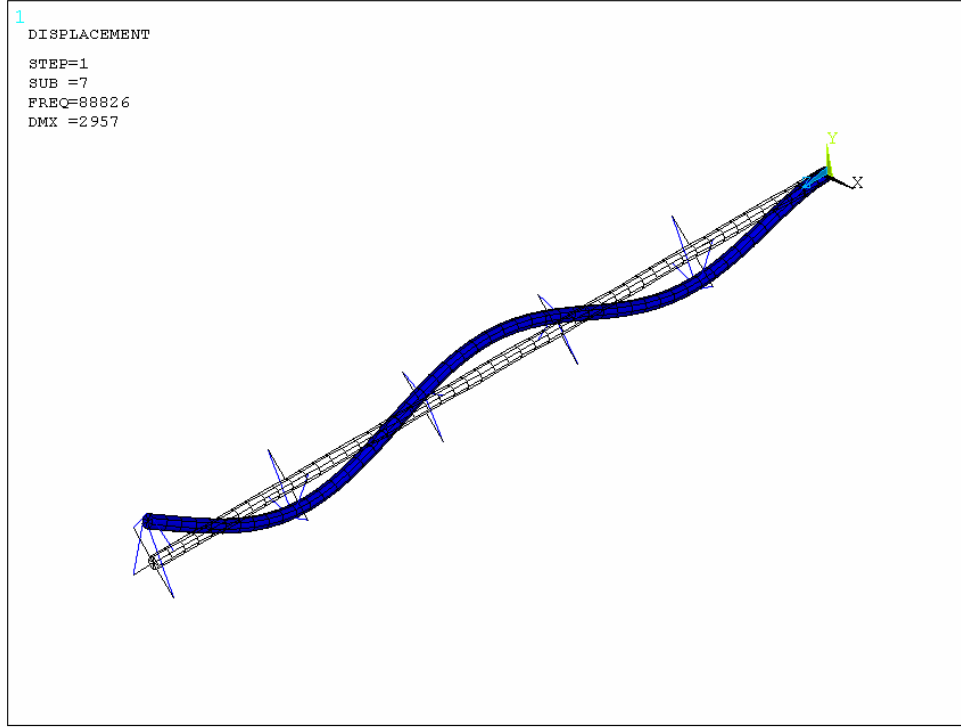
Şekil Ek H.4: Elyaf-yay sistemi serbest titreşim analizi 4. frekans şekli



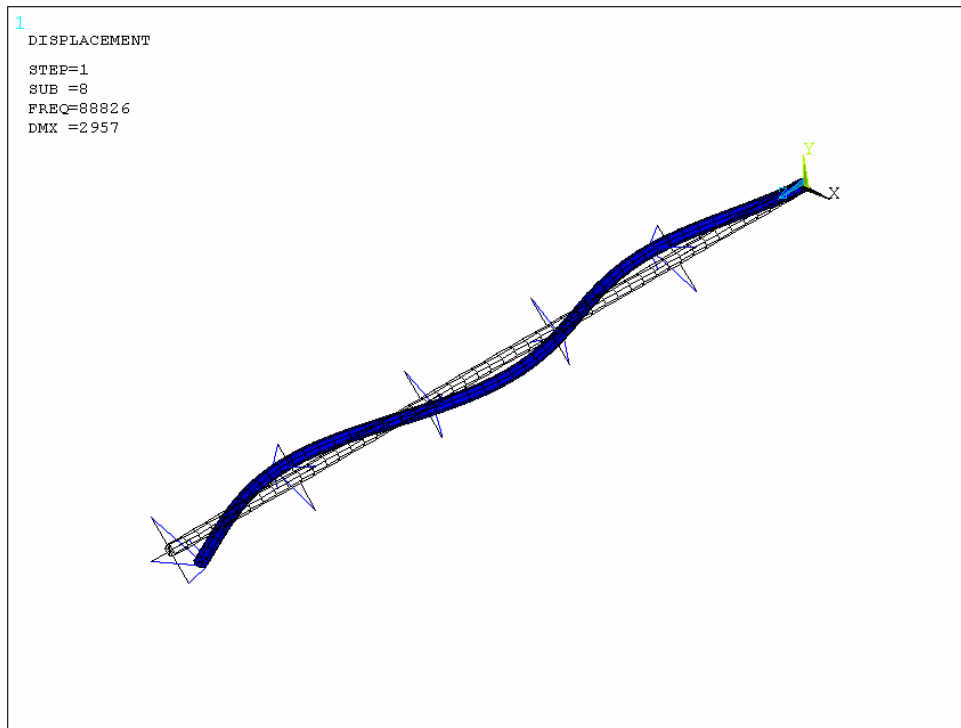
Şekil Ek H.5: Elyaf-yay sistemi serbest titreşim analizi 5. frekans şekli



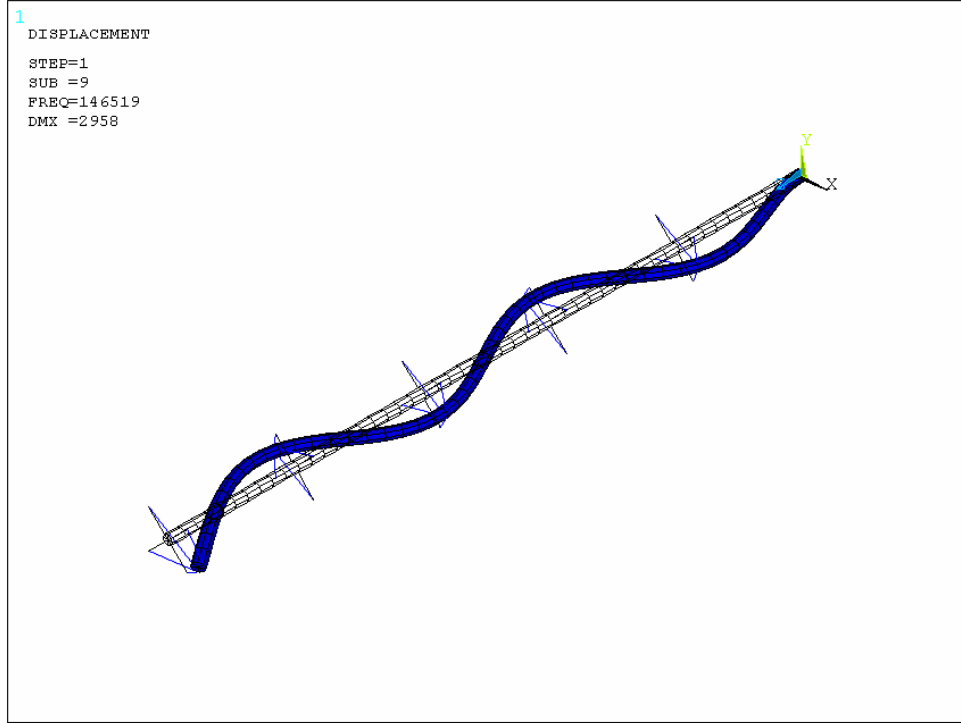
Şekil Ek H.6: Elyaf-yay sistemi serbest titreşim analizi 6. frekans şekli



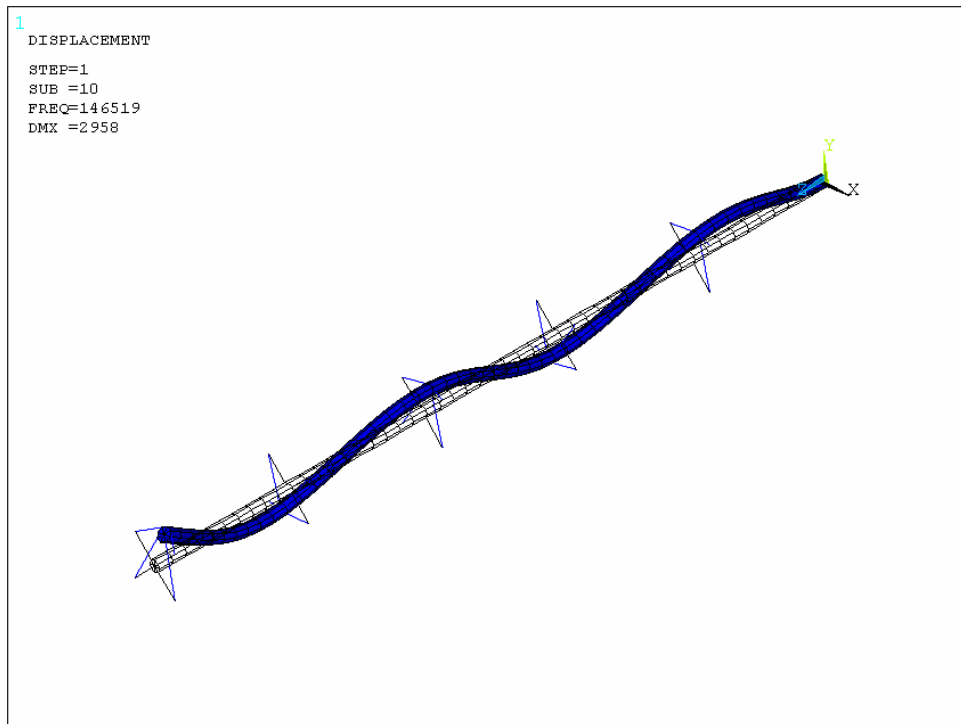
Şekil Ek H.7: Elyaf-yay sistemi serbest titreşim analizi 7. frekans şekli



Şekil Ek H.8: Elyaf-yay sistemi serbest titreşim analizi 8. frekans şekli

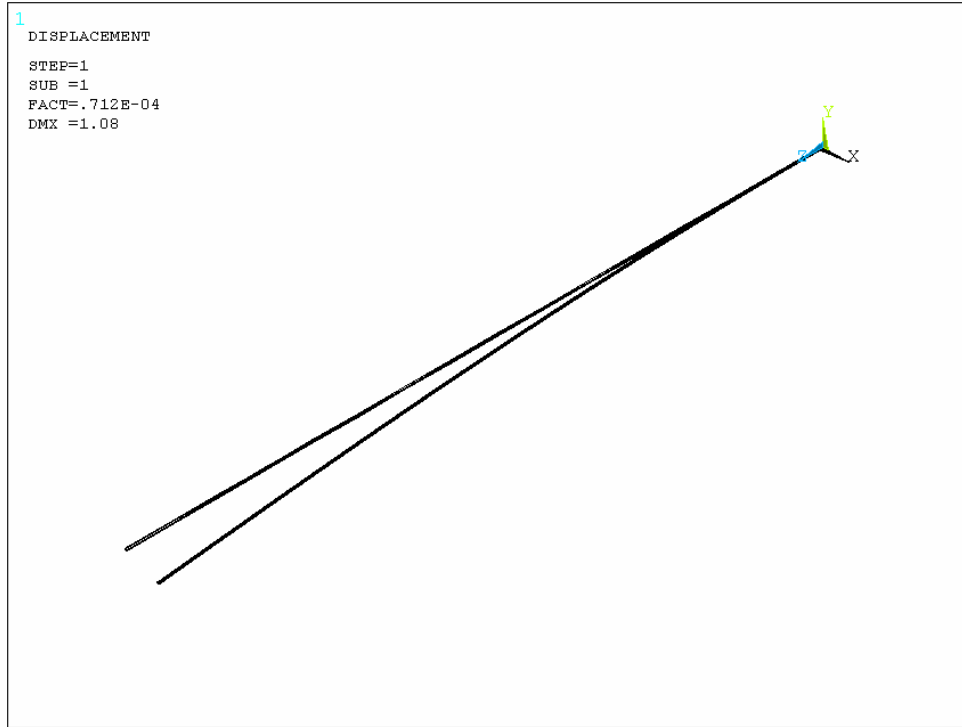


Şekil Ek H.9: Elyaf-yay sistemi serbest titreşim analizi 9. frekans şekli

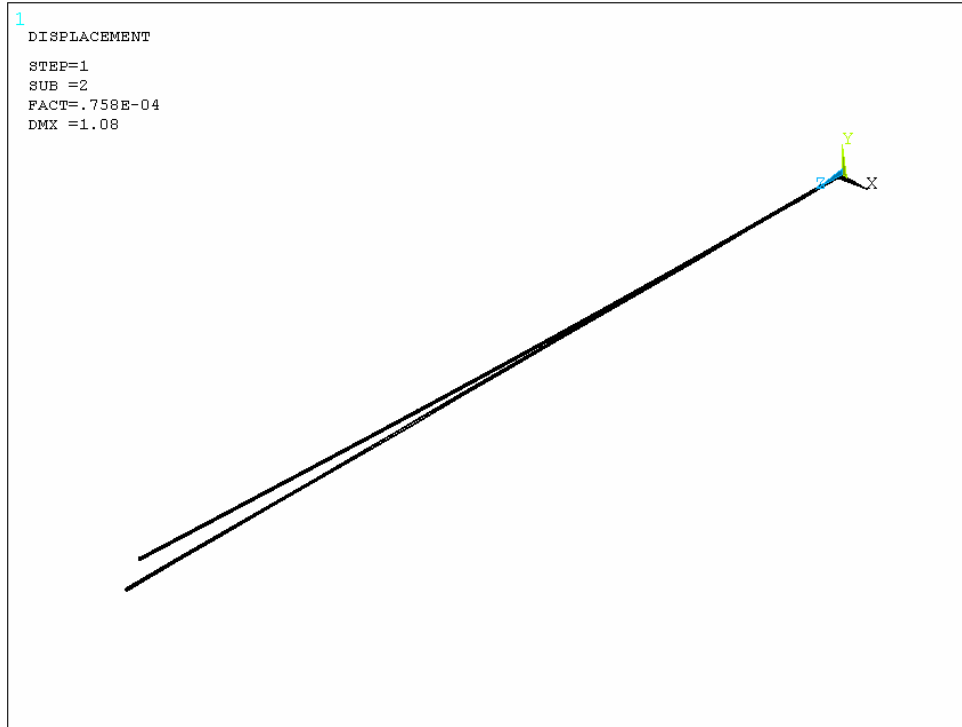


Şekil Ek H.10: Elyaf-yay sistemi serbest titreşim analizi 10. frekans şekli

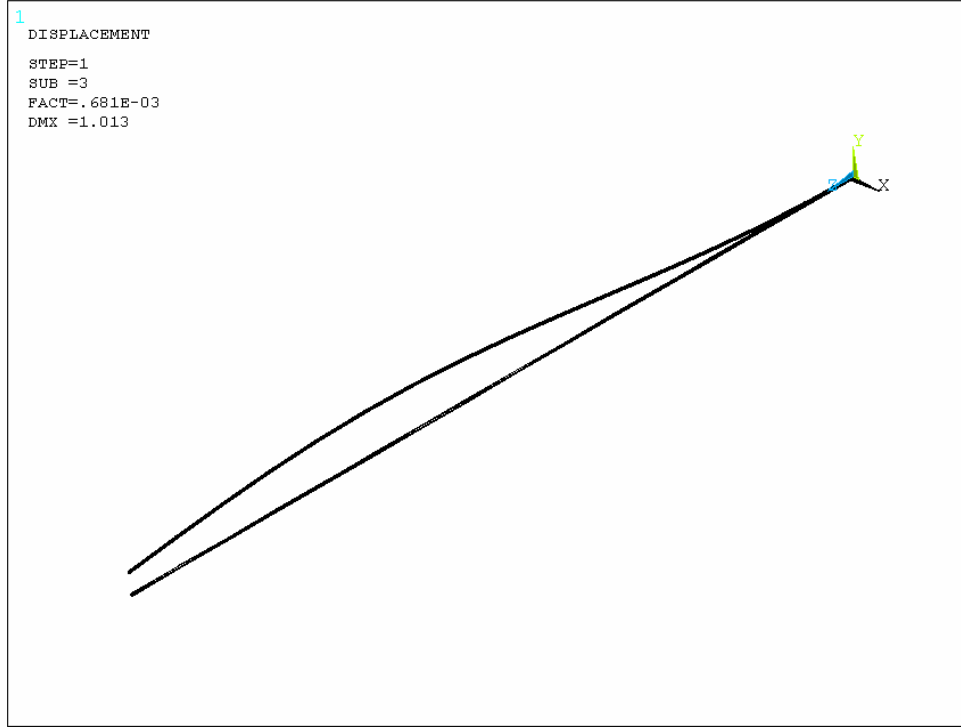
Ek I Cam elyaf analizi mod şekilleri



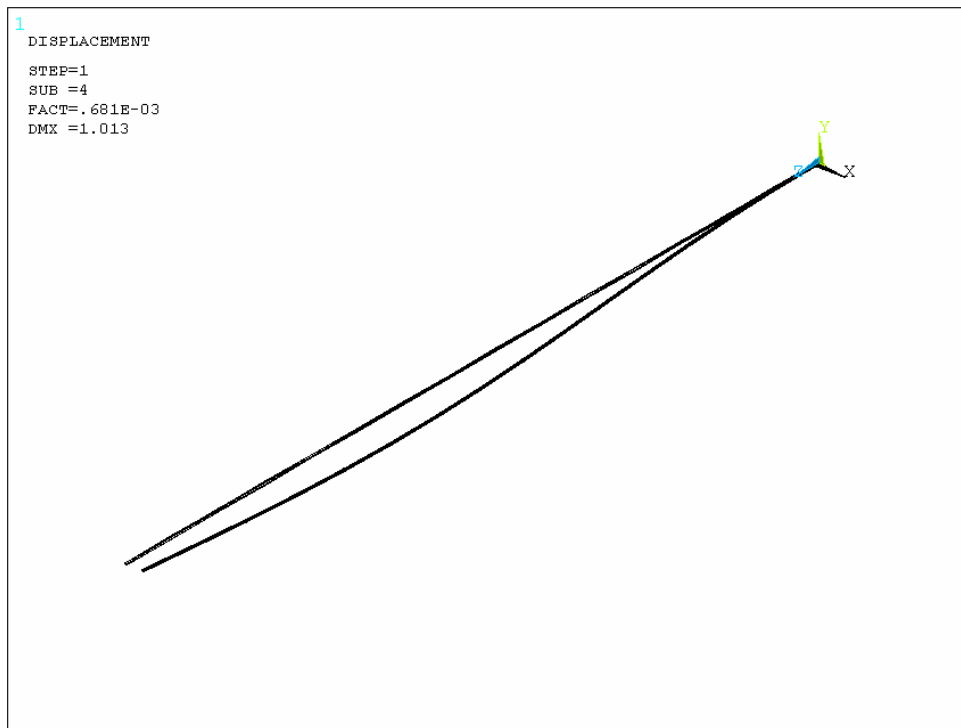
Şekil Ek I.1: Cam elyaf analizi 1. mod şekli



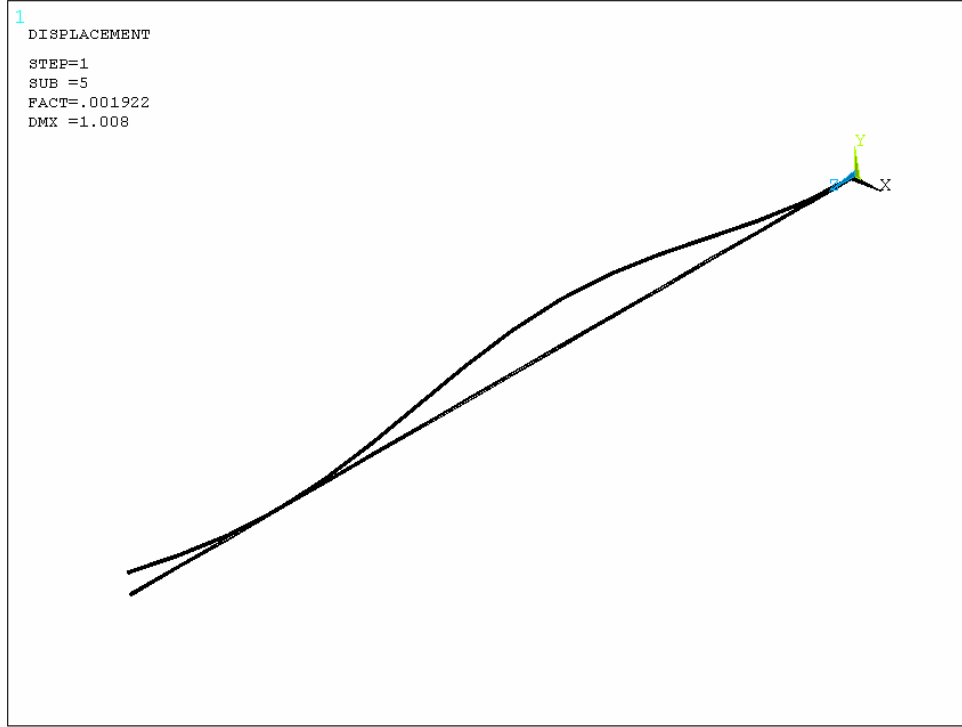
Şekil Ek I.2: Cam elyaf analizi 2. mod şekli



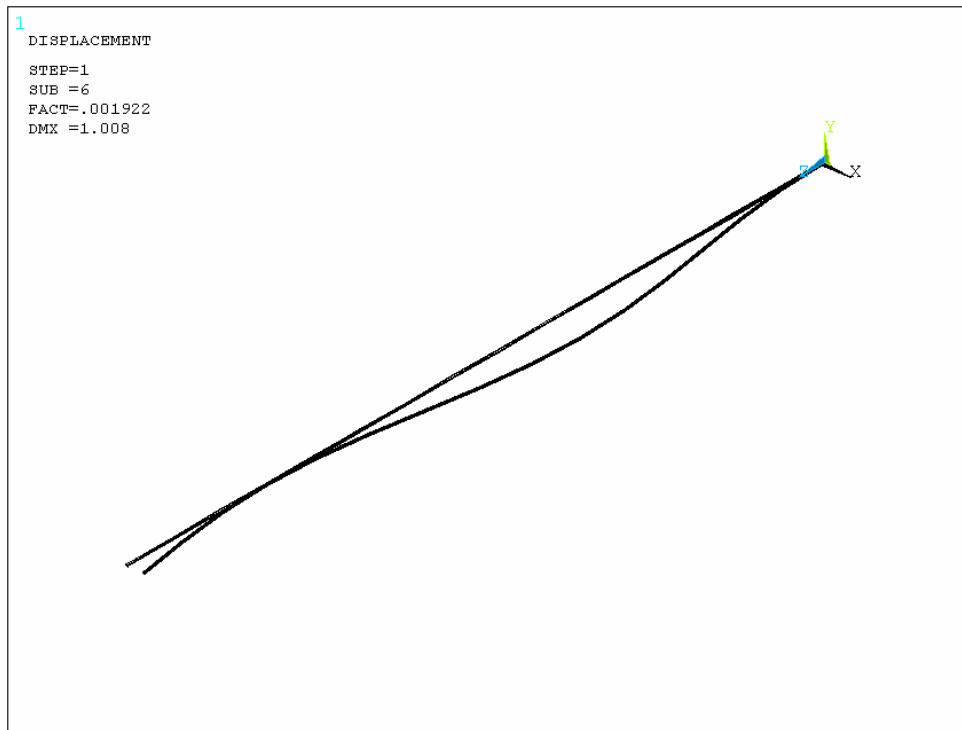
Şekil Ek I.3: Cam elyaf analizi 3. mod şekli



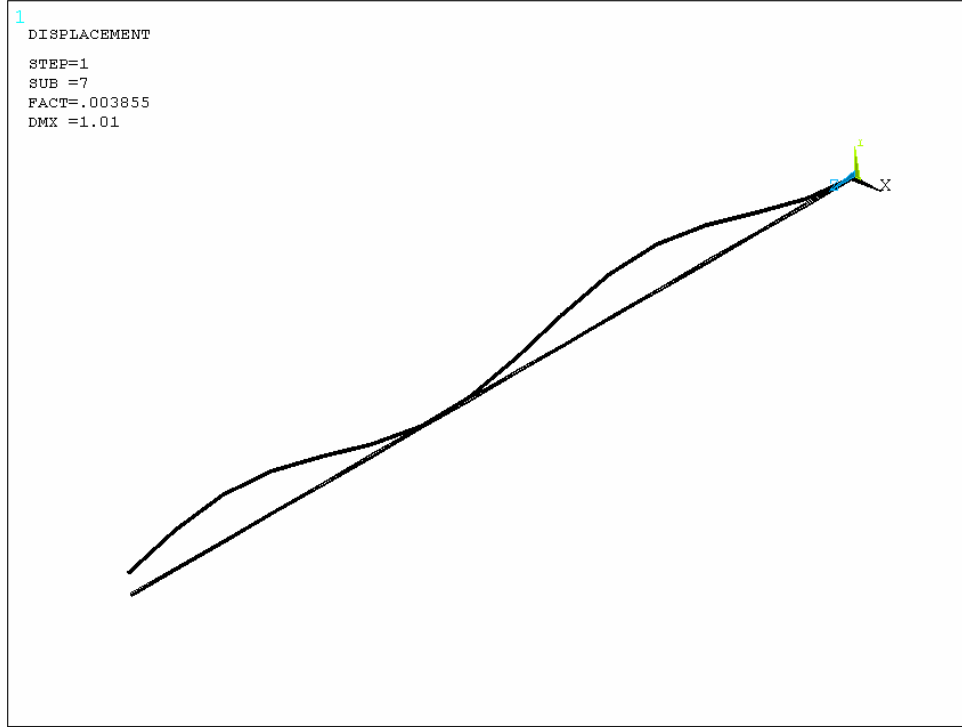
Şekil Ek I.4: Cam elyaf analizi 4. mod şekli



Şekil Ek I.5: Cam elyaf analizi 5. mod şekli



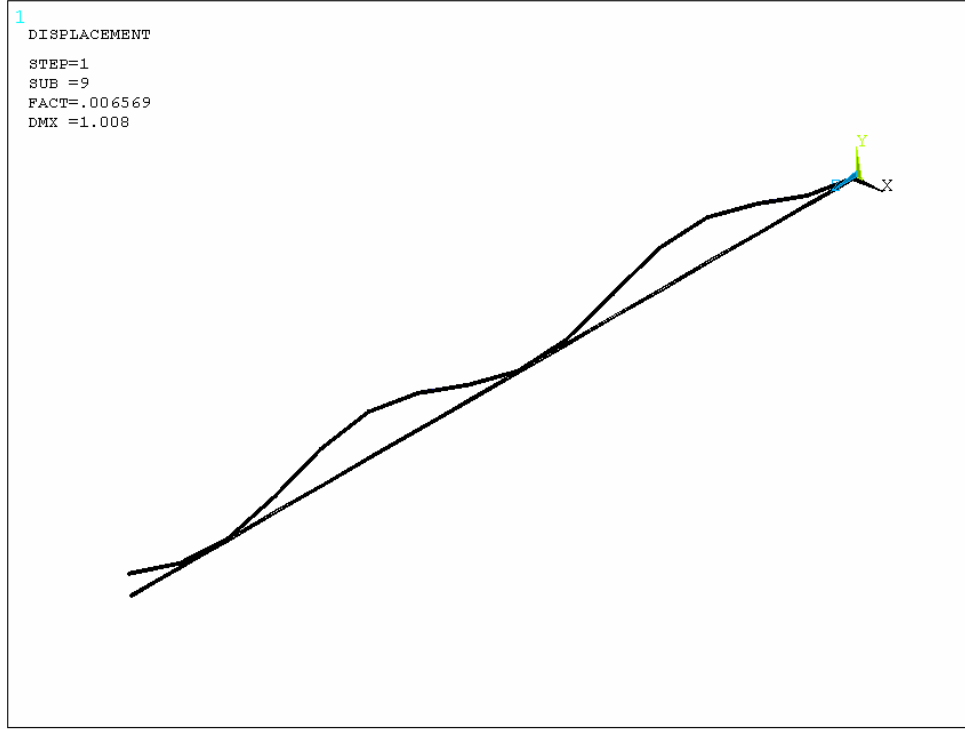
Şekil Ek I.6: Cam elyaf analizi 6. mod şekli



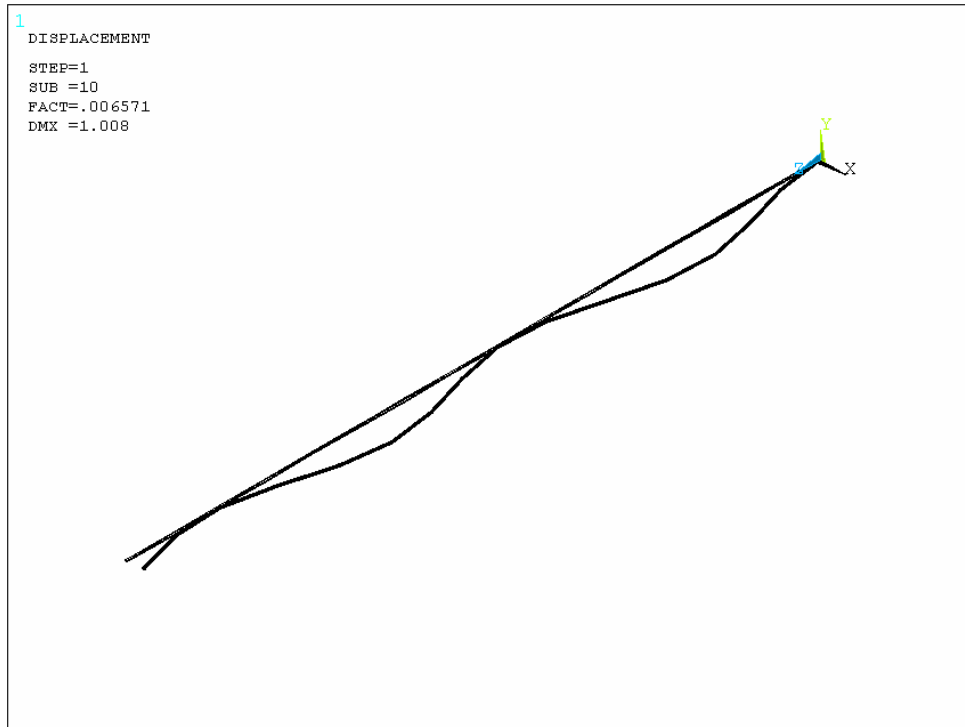
Şekil Ek I.7: Cam elyaf analizi 7. mod şekli



Şekil Ek I.8: Cam elyaf analizi 8. mod şekli

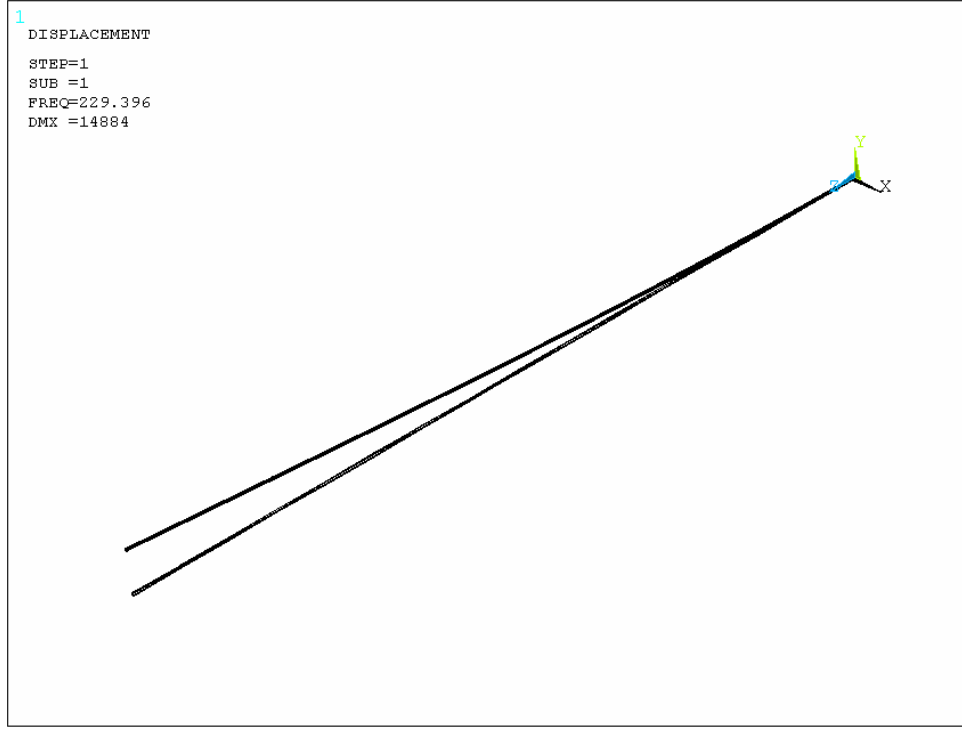


Şekil Ek I.9: Cam elyaf analizi 9. mod şekli

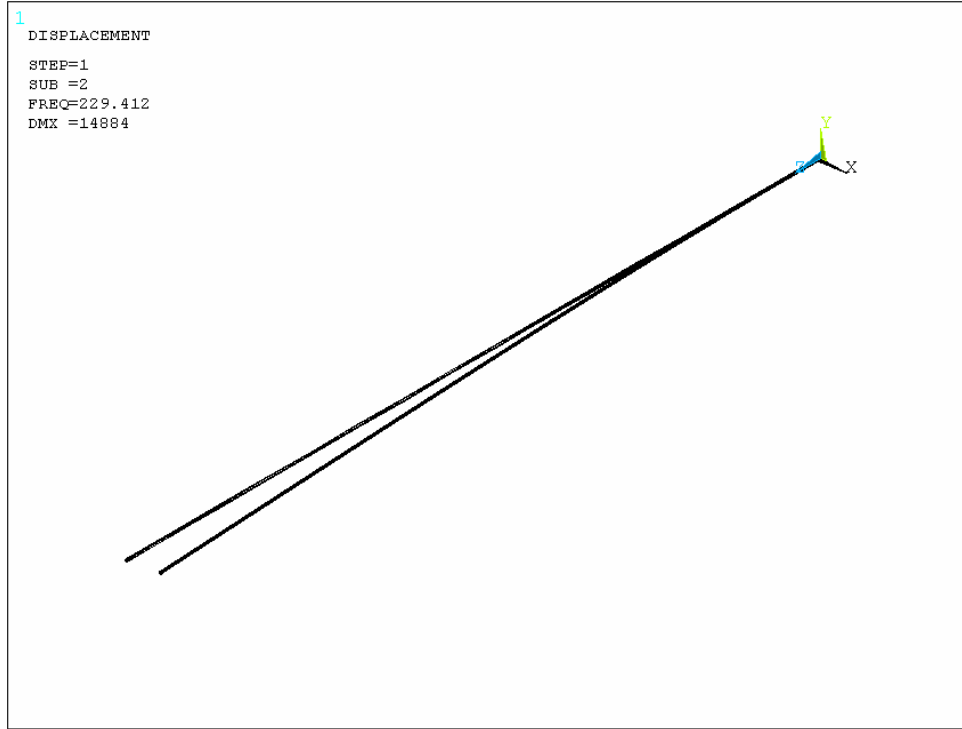


Şekil Ek I.10: Cam elyaf analizi 10. mod şekli

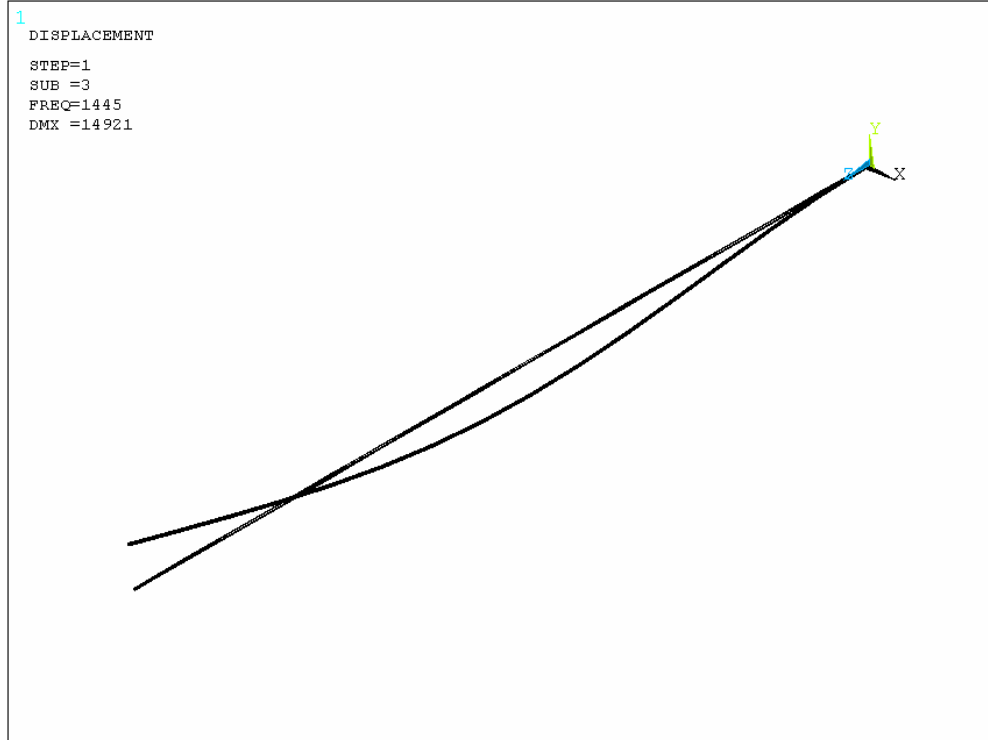
Ek J Cam elyaf serbest titreşim analizi frekans şekilleri



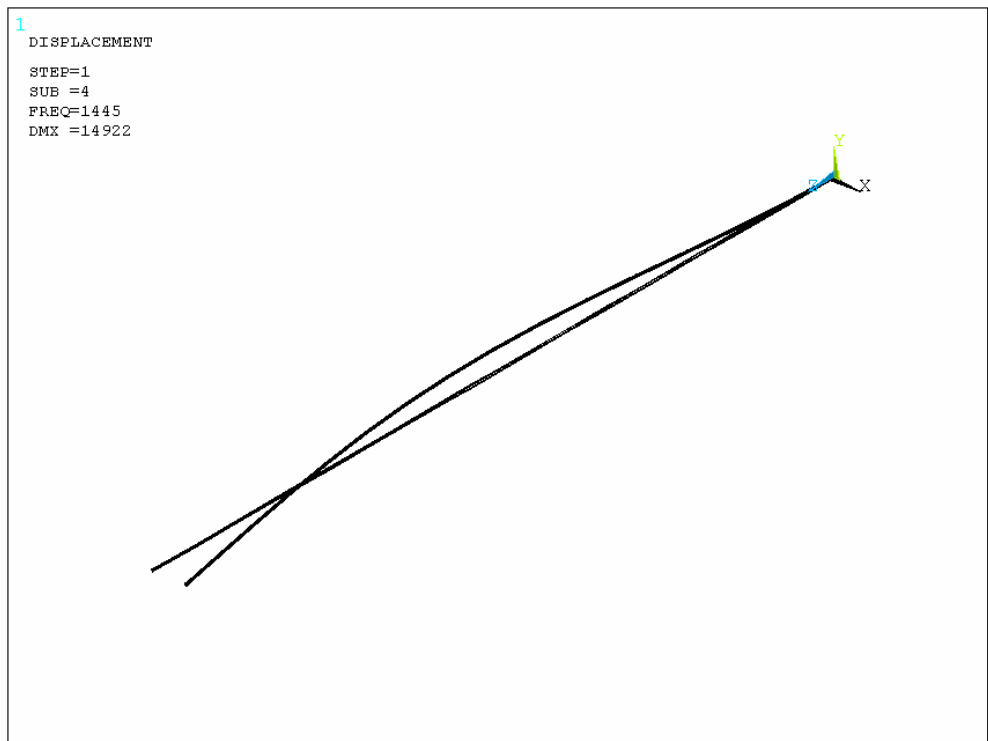
Şekil Ek J.1: Cam elyaf serbest titreşim analizi 1. frekans şekli



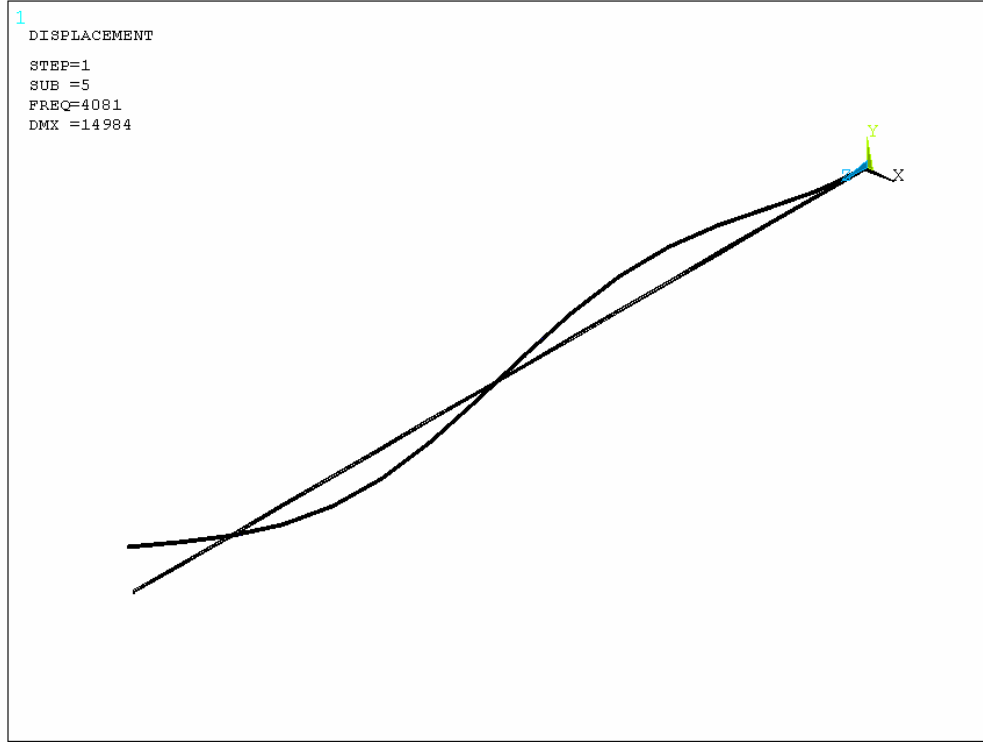
Şekil Ek J.2: Cam elyaf serbest titreşim analizi 2. frekans şekli



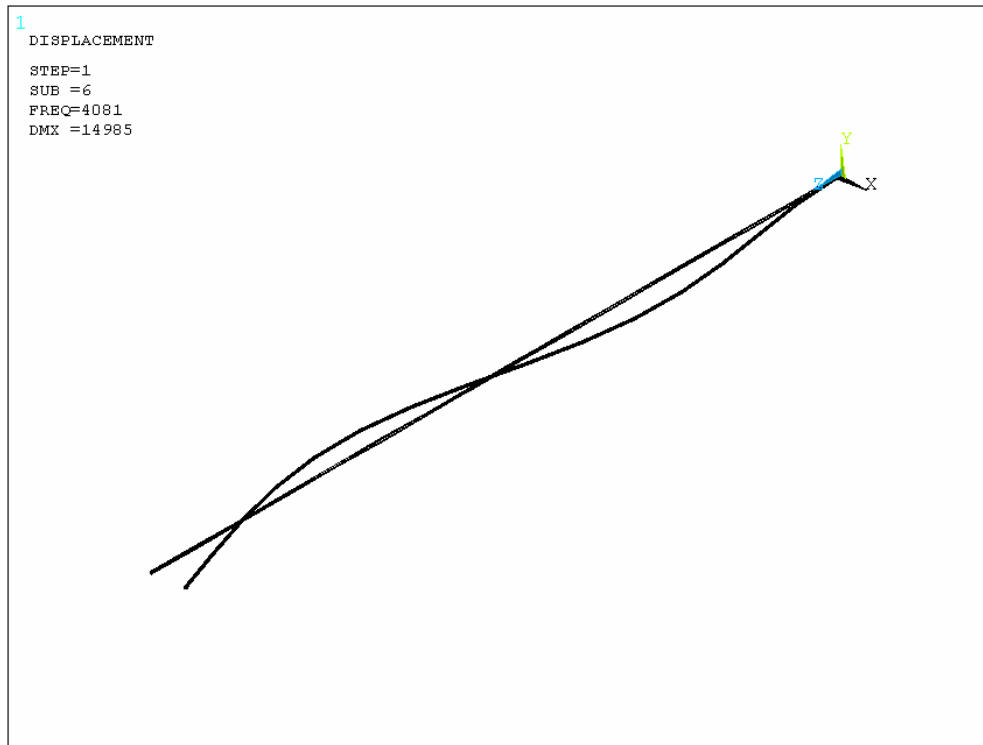
Şekil Ek J.3: Cam elyaf serbest titreşim analizi 3. frekans şekli



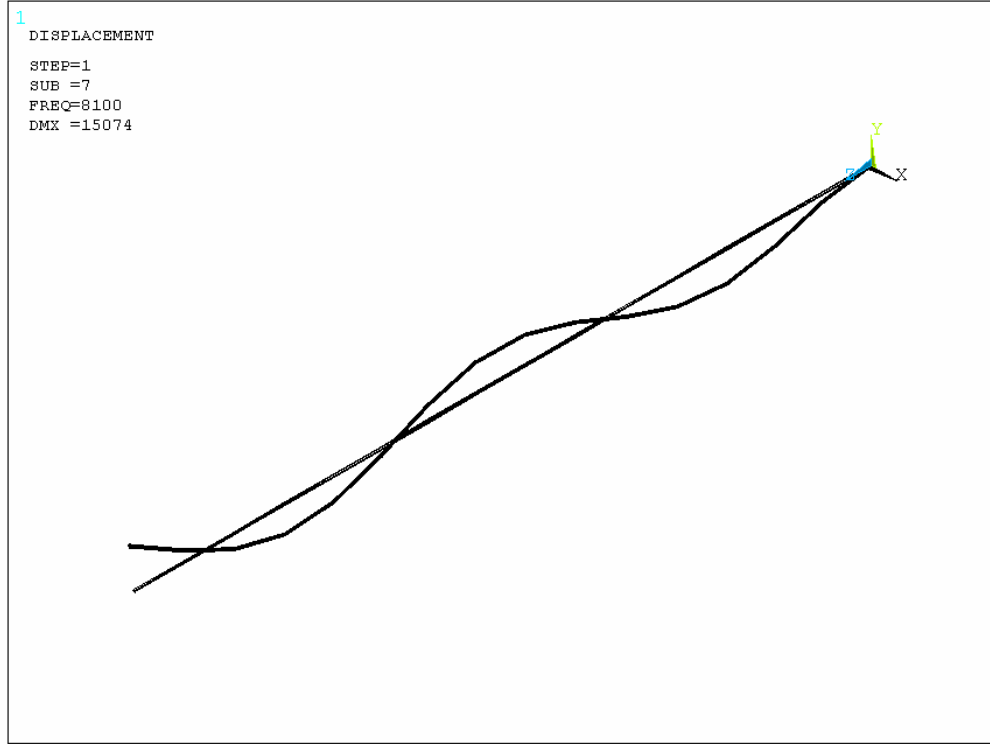
Şekil Ek J.4: Cam elyaf serbest titreşim analizi 4. frekans şekli



Şekil Ek J.5: Cam elyaf serbest titreşim analizi 5. frekans şekli



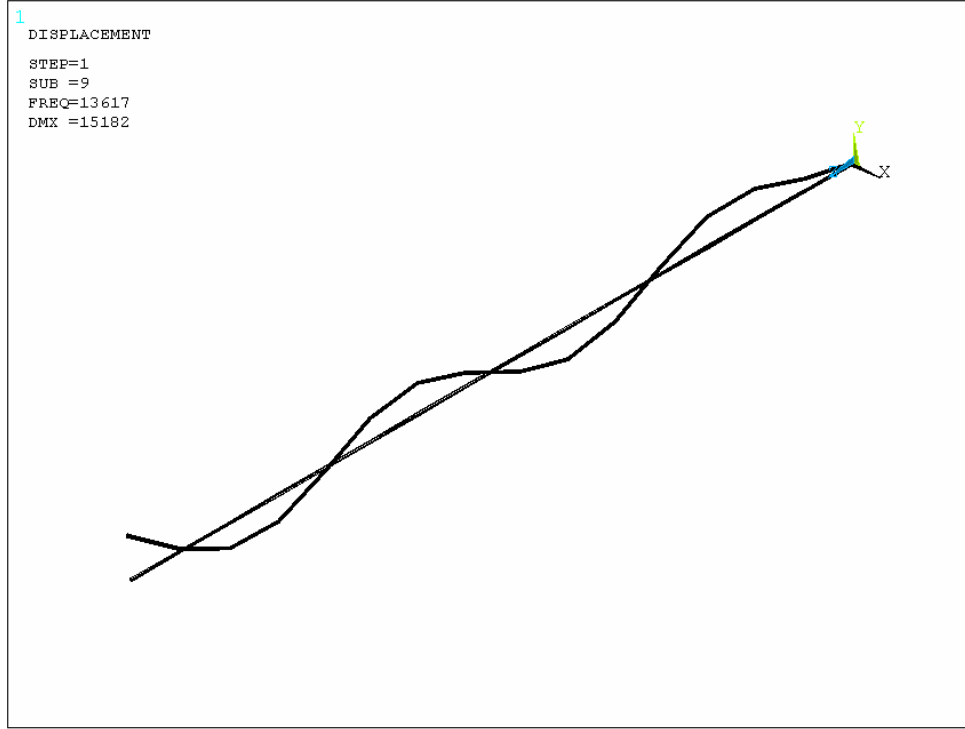
Şekil Ek J.6: Cam elyaf serbest titreşim analizi 6. frekans şekli



Şekil Ek J.7: Cam elyaf serbest titreşim analizi 7. frekans şekli



Şekil Ek J.8: Cam elyaf serbest titreşim analizi 8. frekans şekli

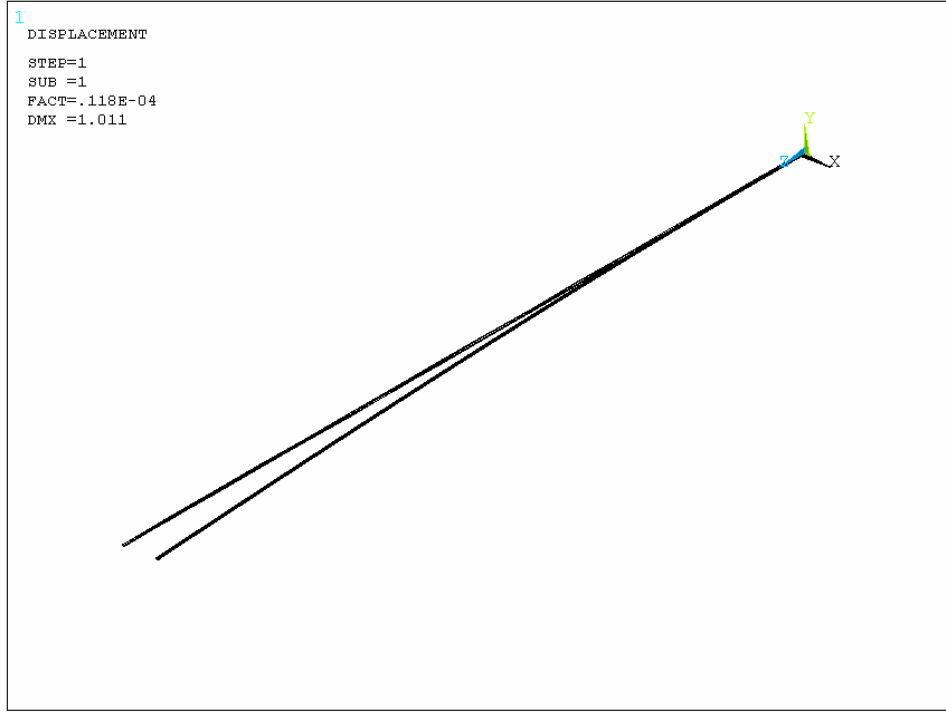


Şekil Ek J.9: Cam elyaf serbest titreşim analizi 9. frekans şekli

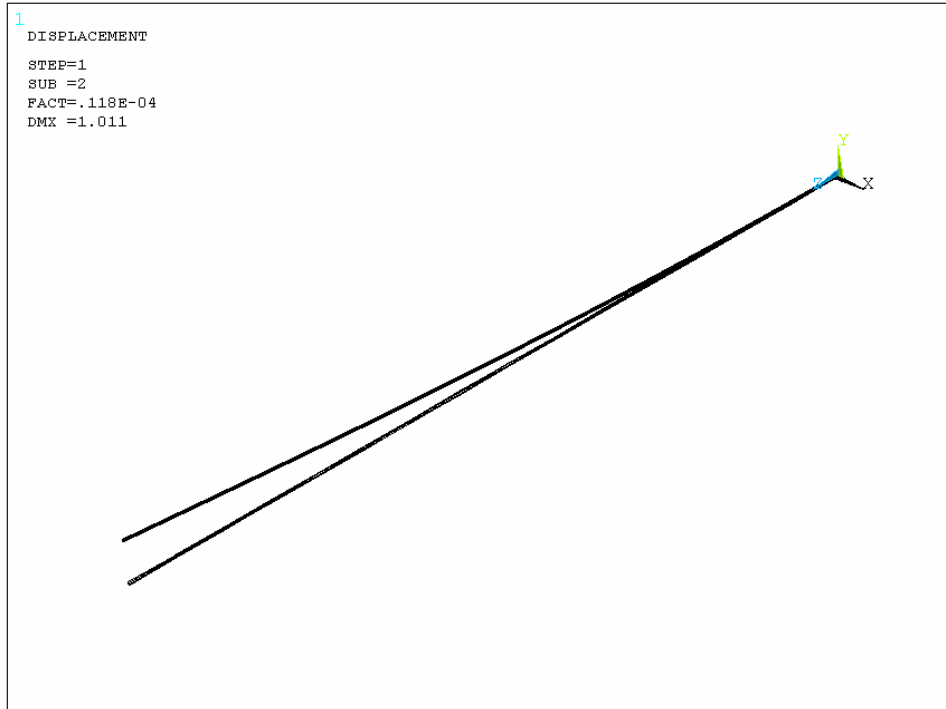


Şekil Ek J.10: Cam elyaf serbest titreşim analizi 10. frekans şekli

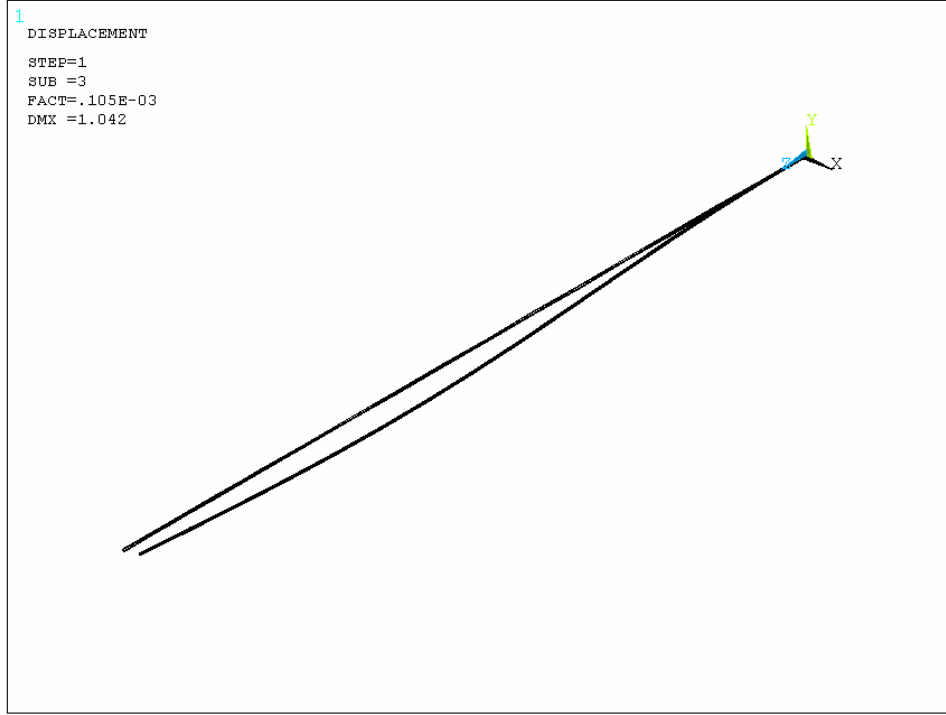
Ek K Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi mod şekilleri



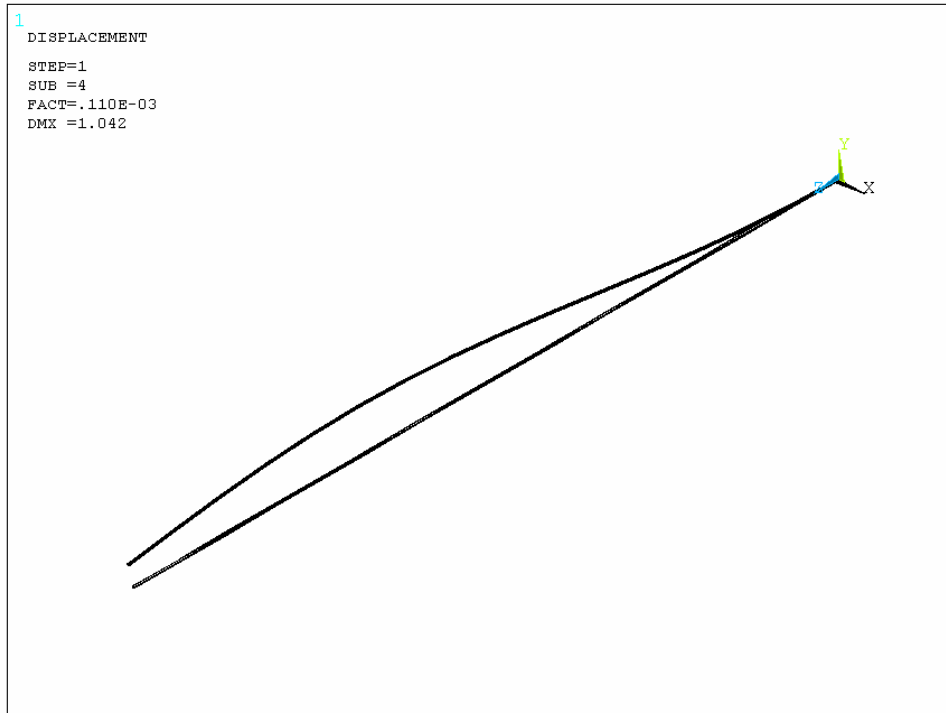
Şekil Ek K.1: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 1. mod şekli



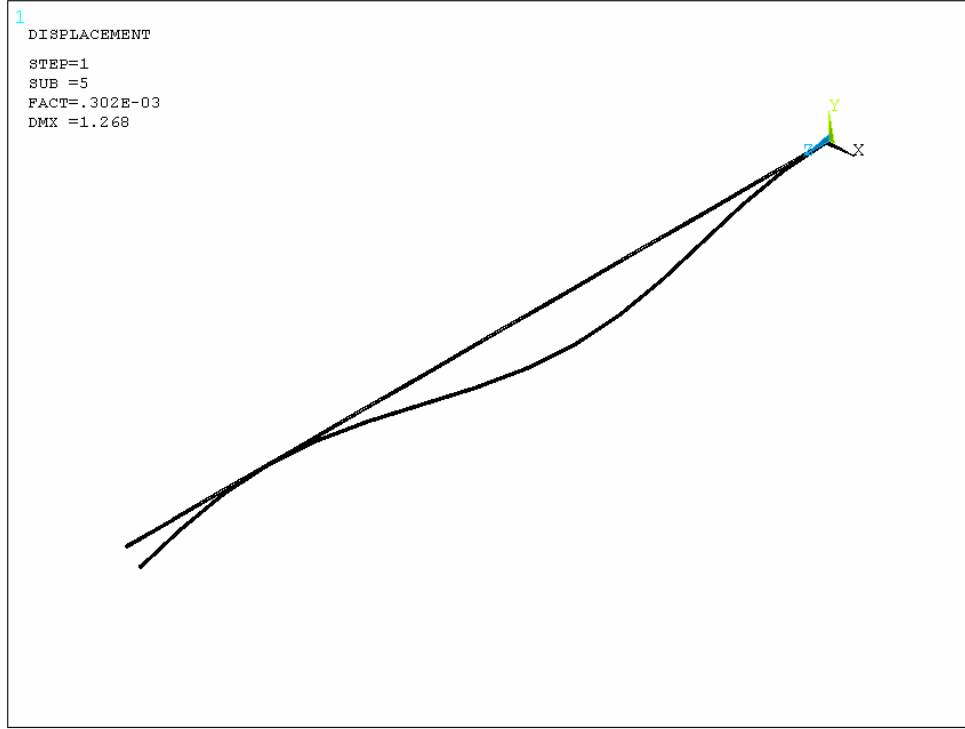
Şekil Ek K.2: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 2. mod şekli



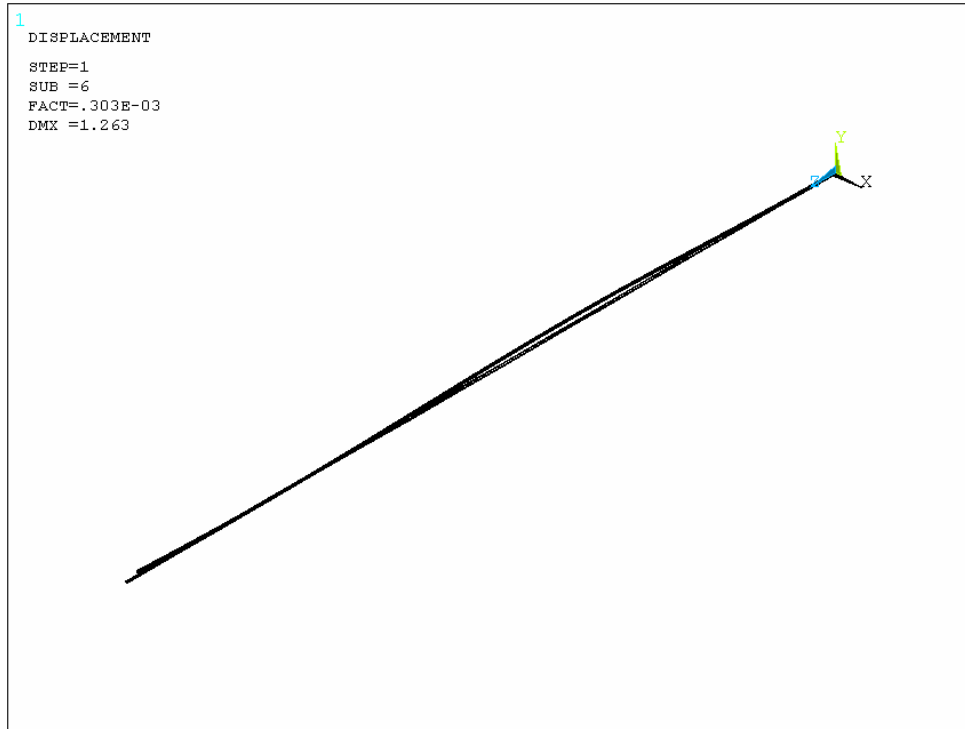
Şekil Ek K.3: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 3. mod şekli



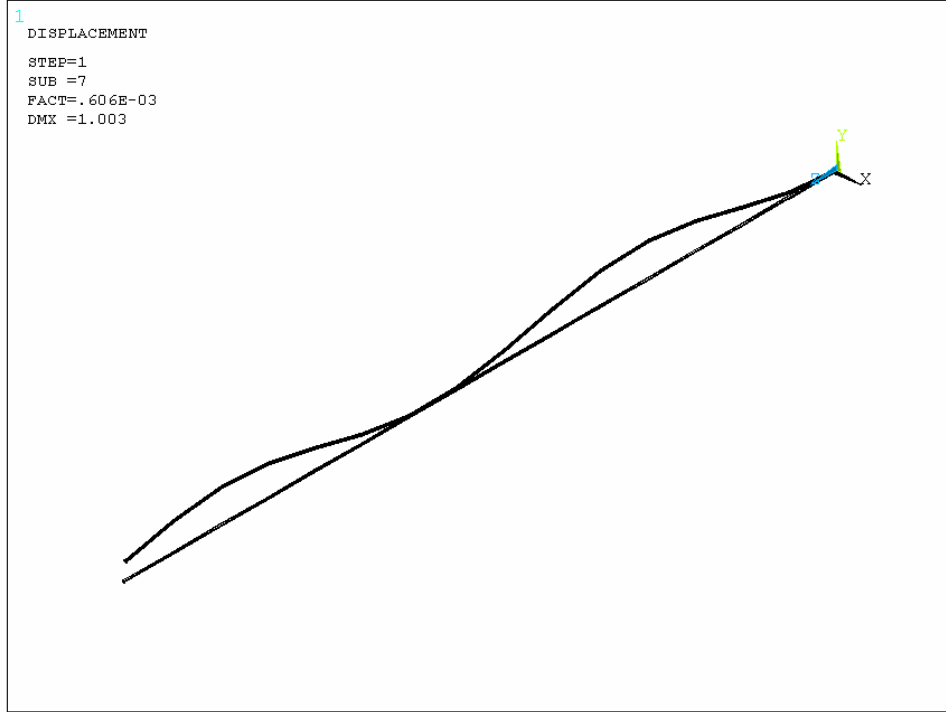
Şekil Ek K.4: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 4. mod şekli



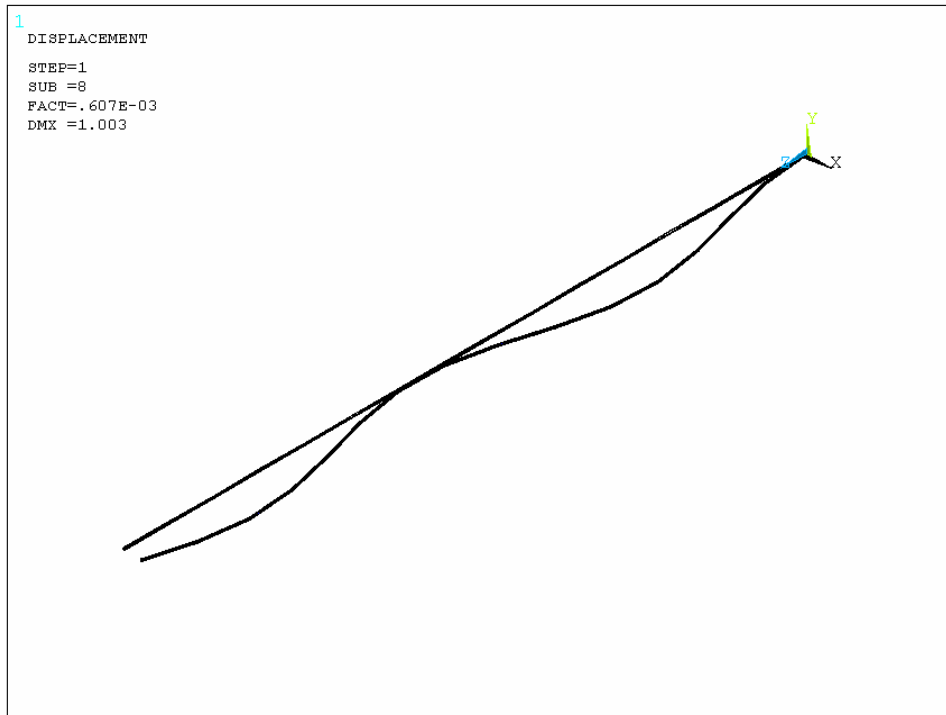
Şekil Ek K.5: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 5. mod şekli



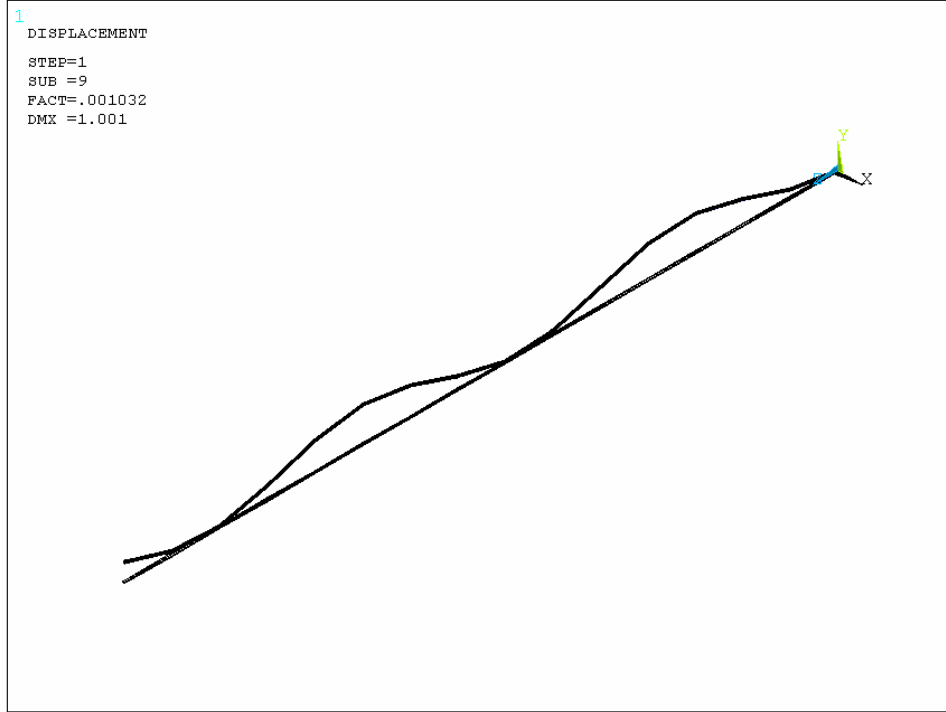
Şekil Ek K.6: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 6. mod şekli



Şekil Ek K.7: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 7. mod şekli



Şekil Ek K.8: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 8. mod şekli

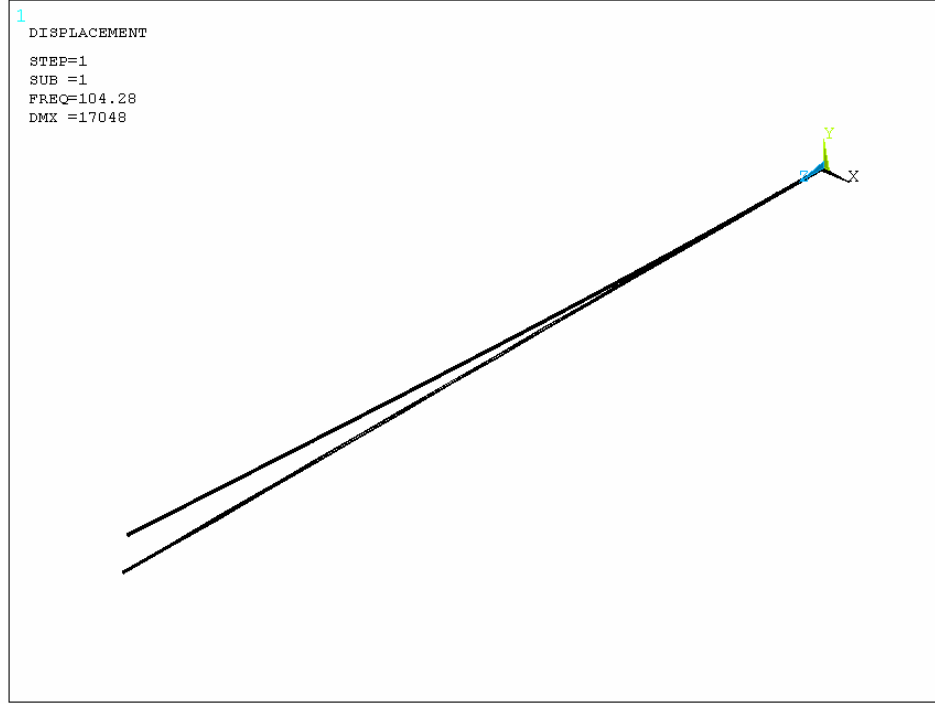


Şekil Ek K.9: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 9. mod şekli

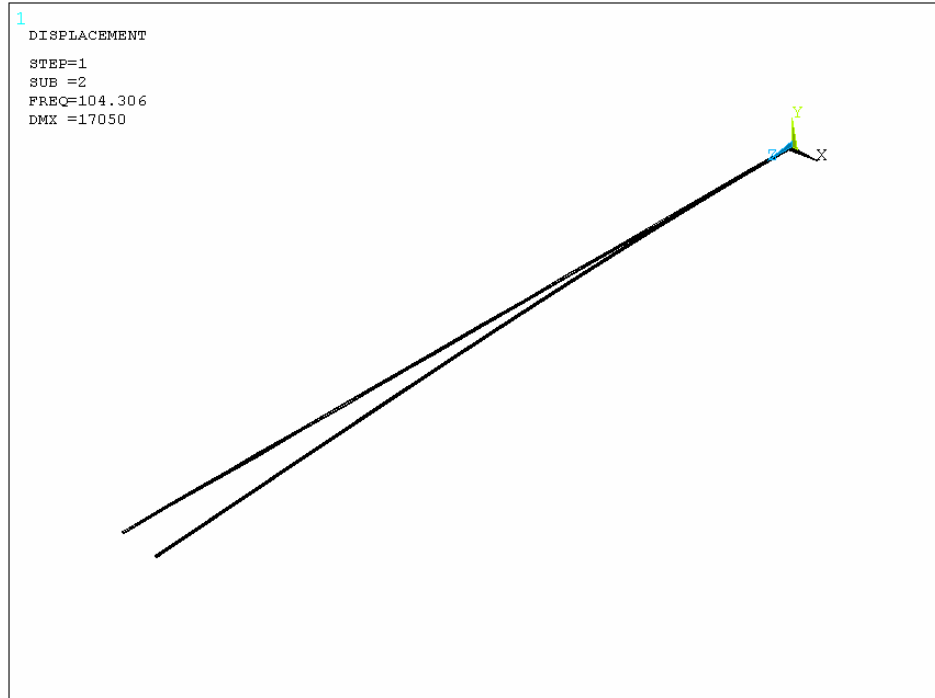


Şekil Ek K.10: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 10. mod şekli

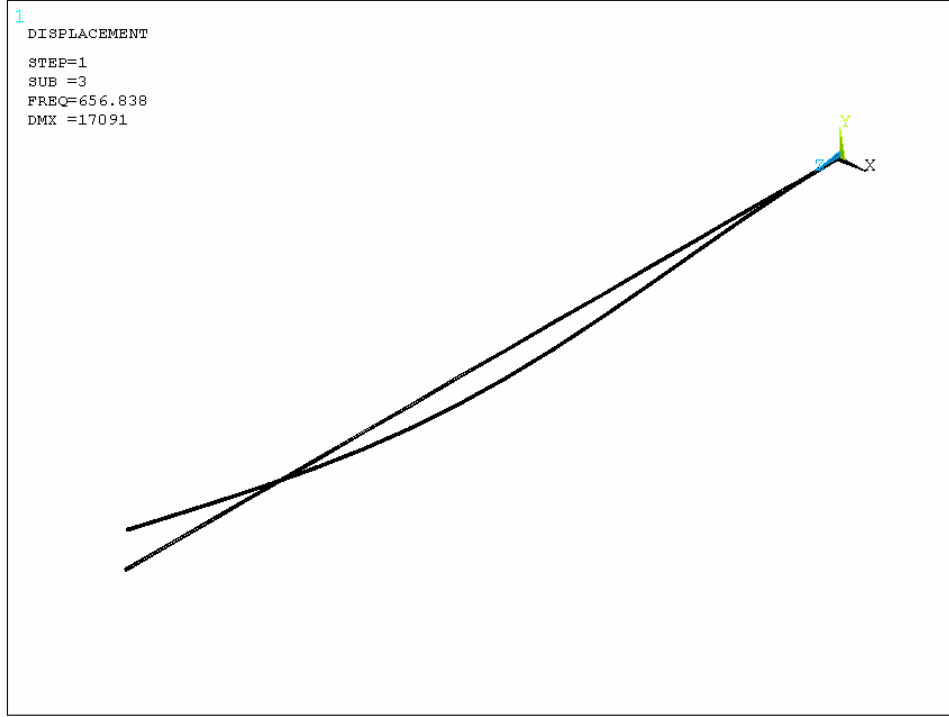
Ek L- Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi frekans şekilleri



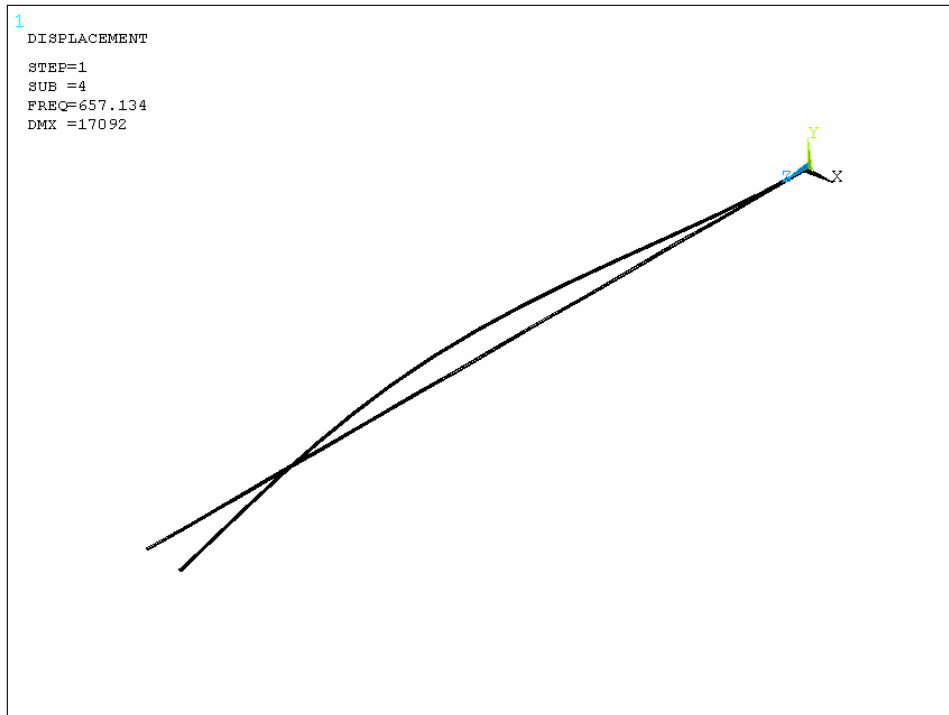
Şekil Ek L.1: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 1. frekans şekli



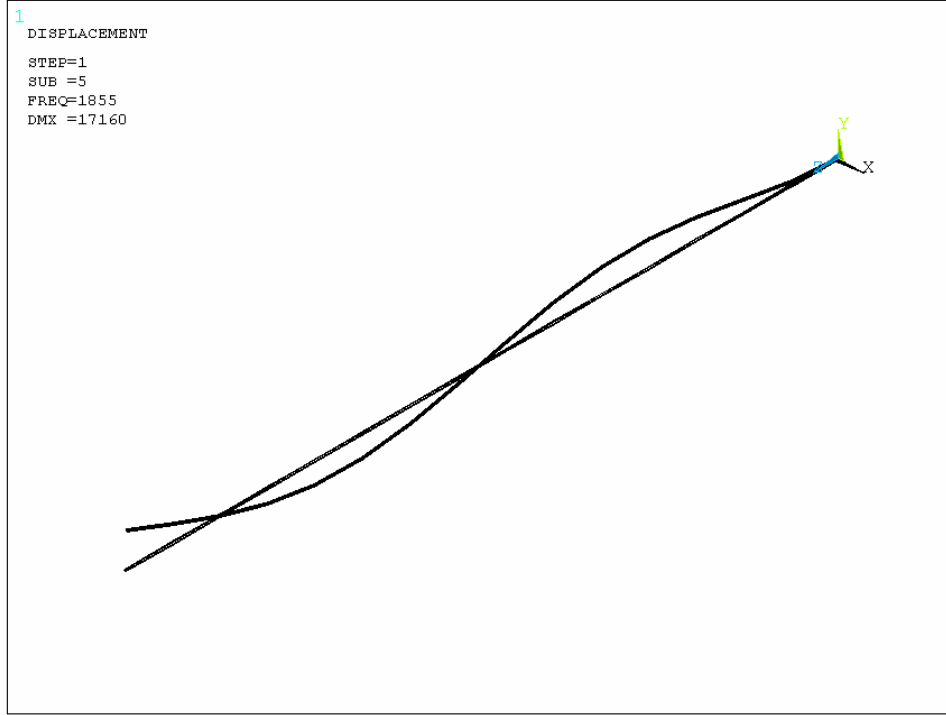
Şekil Ek L.2: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 2. frekans şekli



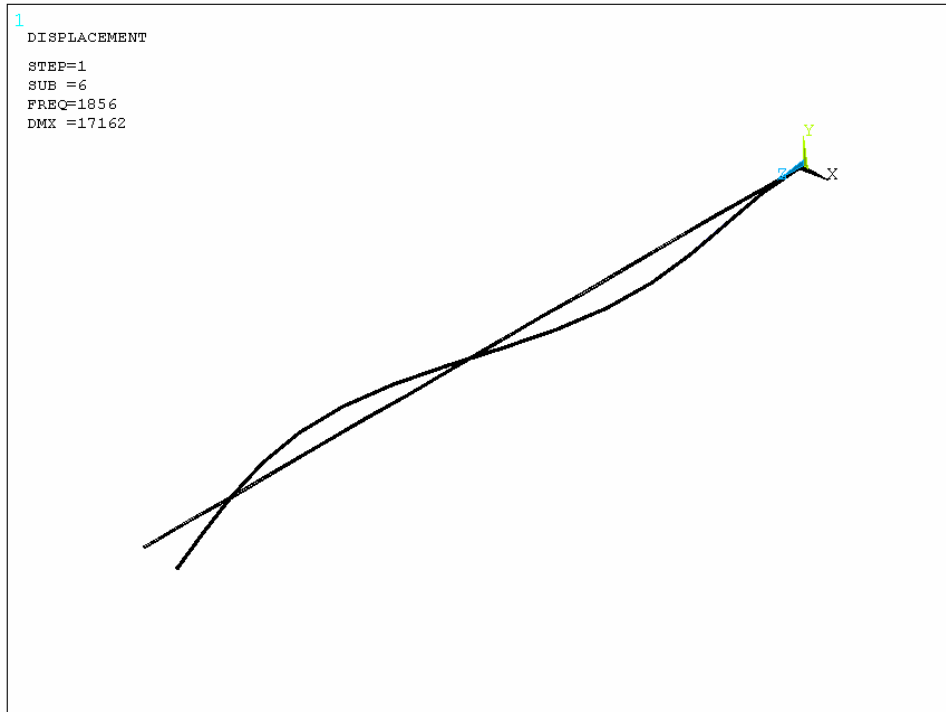
Şekil Ek L.3: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 3. frekans şekli



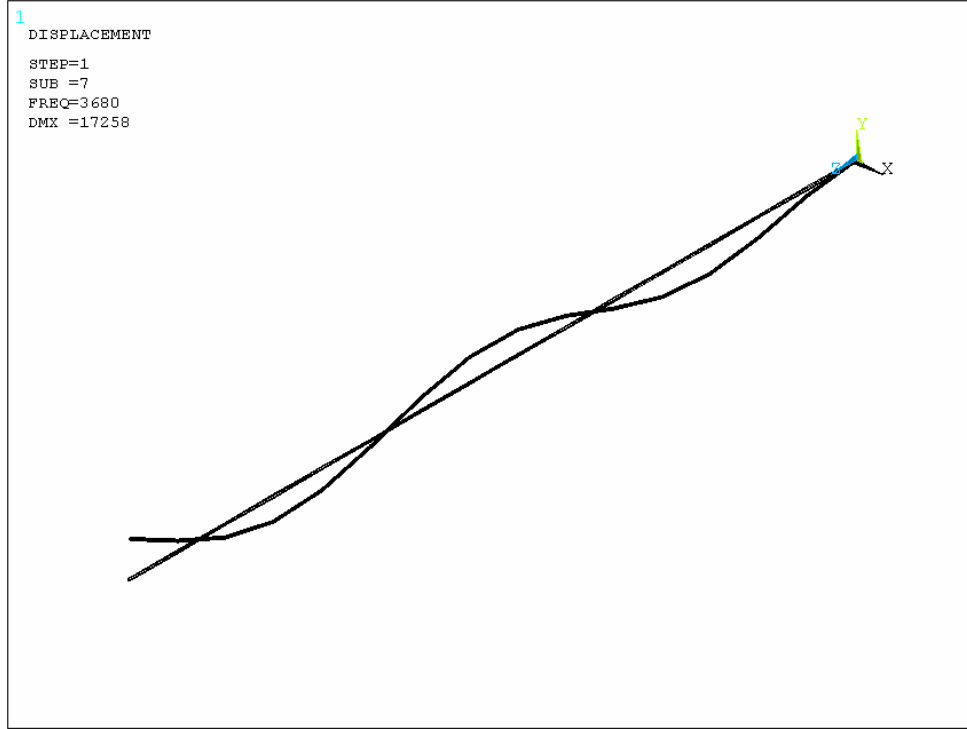
Şekil Ek L.4: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 4. frekans şekli



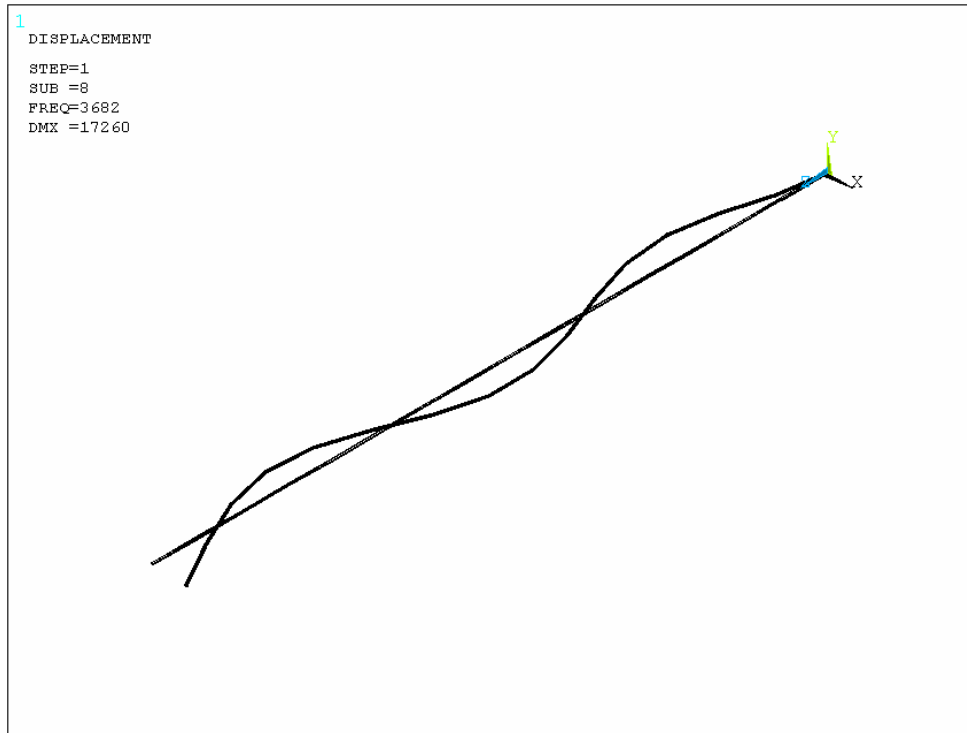
Şekil Ek L.5: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 5. frekans şekli



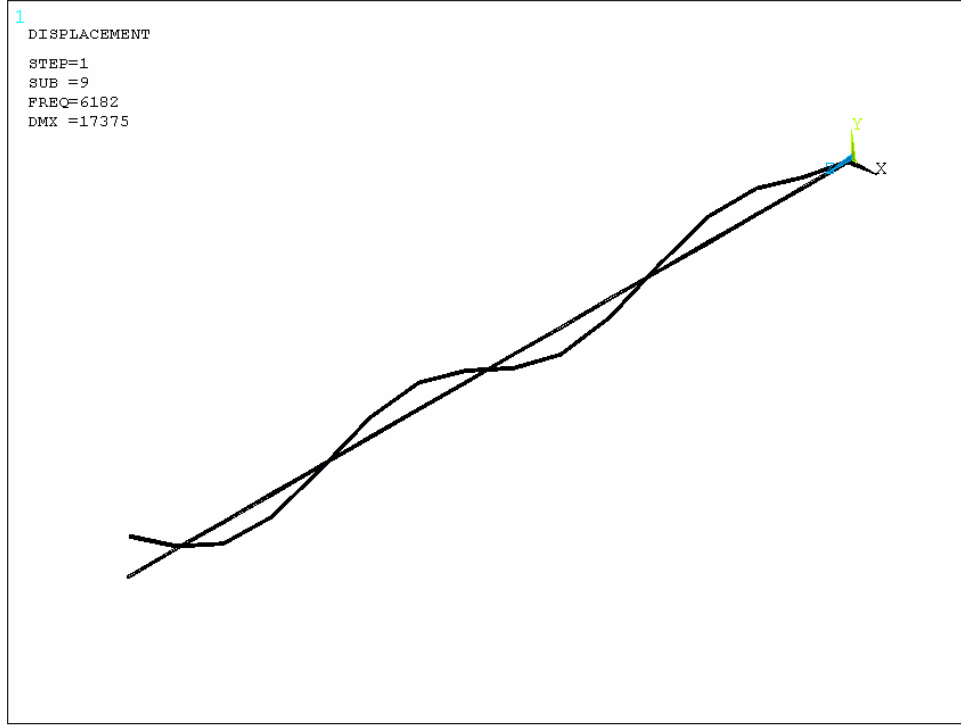
Şekil Ek L.6: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 6. frekans şekli



Şekil Ek L.7: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 7. frekans şekli



Şekil Ek L.8: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 8. frekans şekli

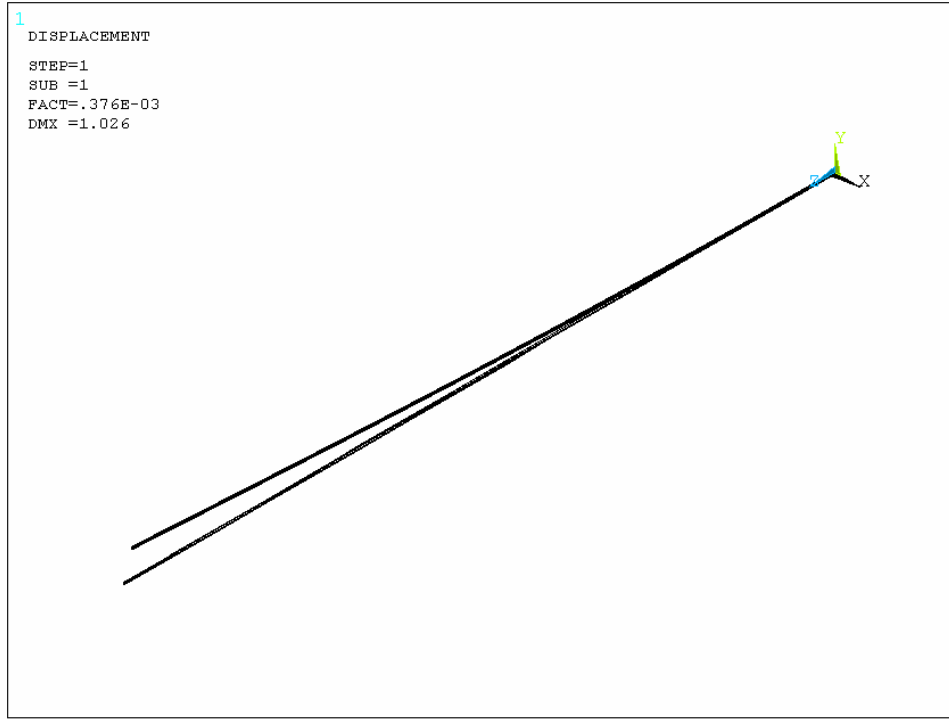


Şekil Ek L.9: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 9. frekans şekli

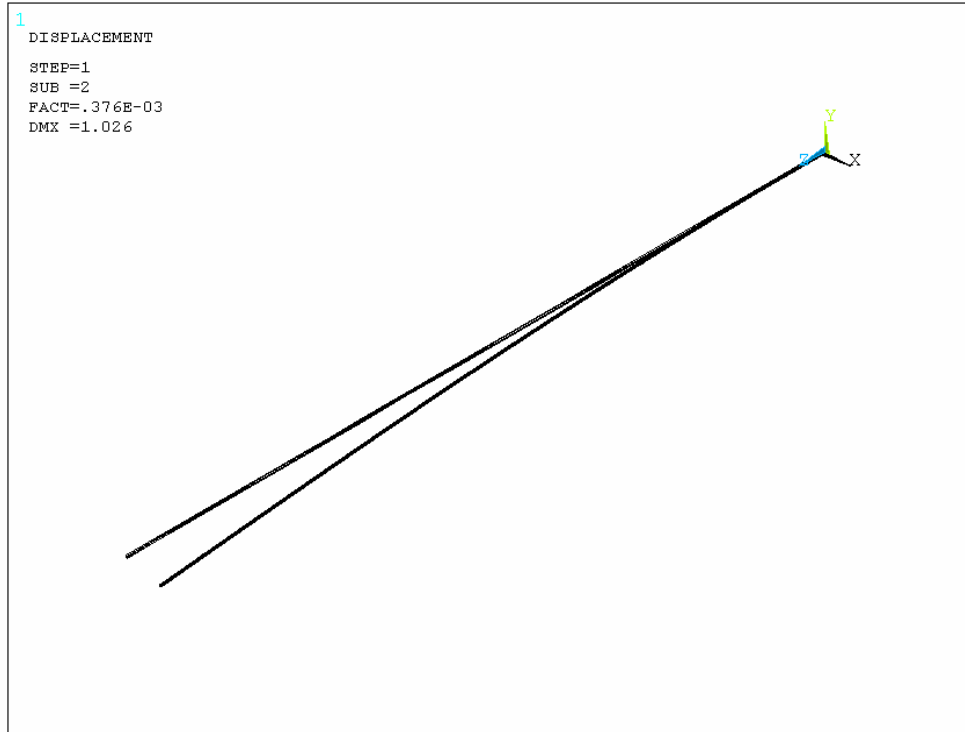


Şekil Ek L.10: Ortotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf serbest titreşim analizi 10. frekans şekli

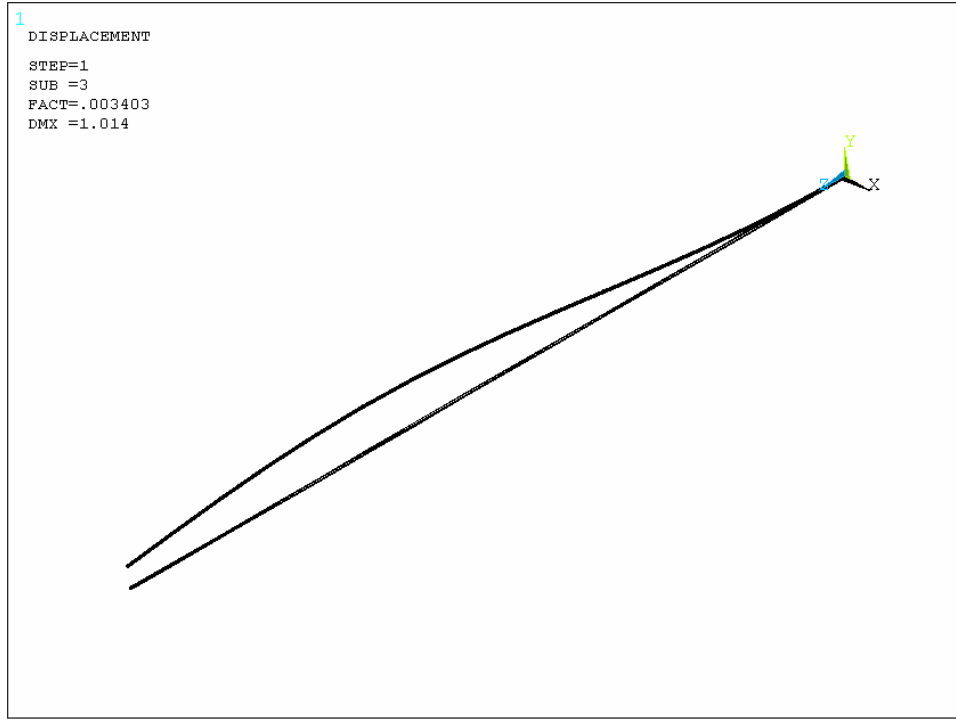
Ek M İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi mod şekilleri



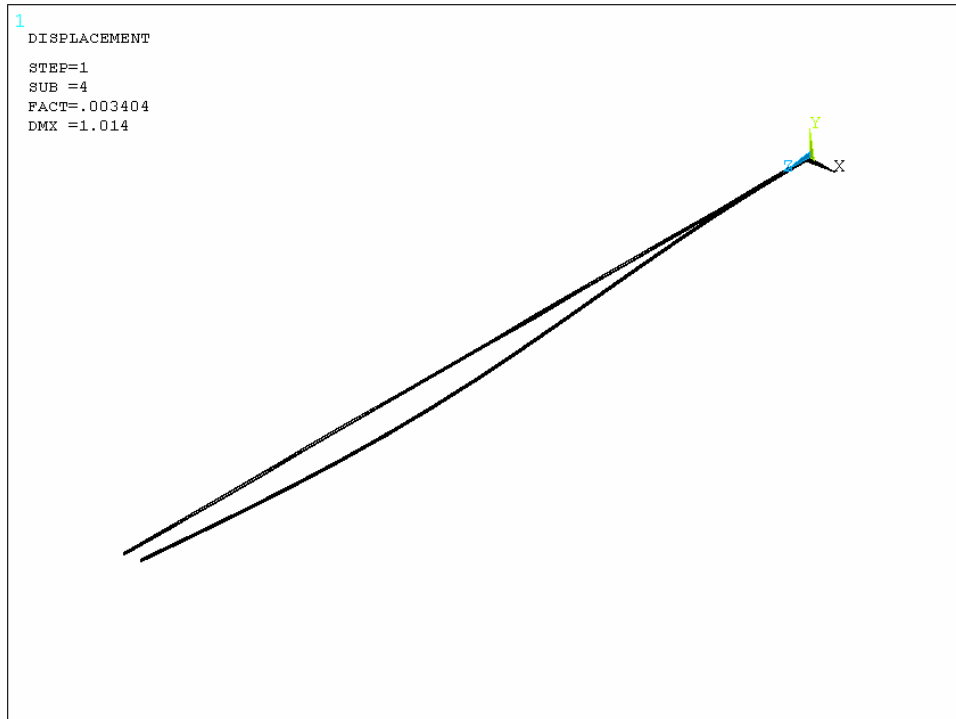
Şekil Ek M.1: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 1. mod şekli



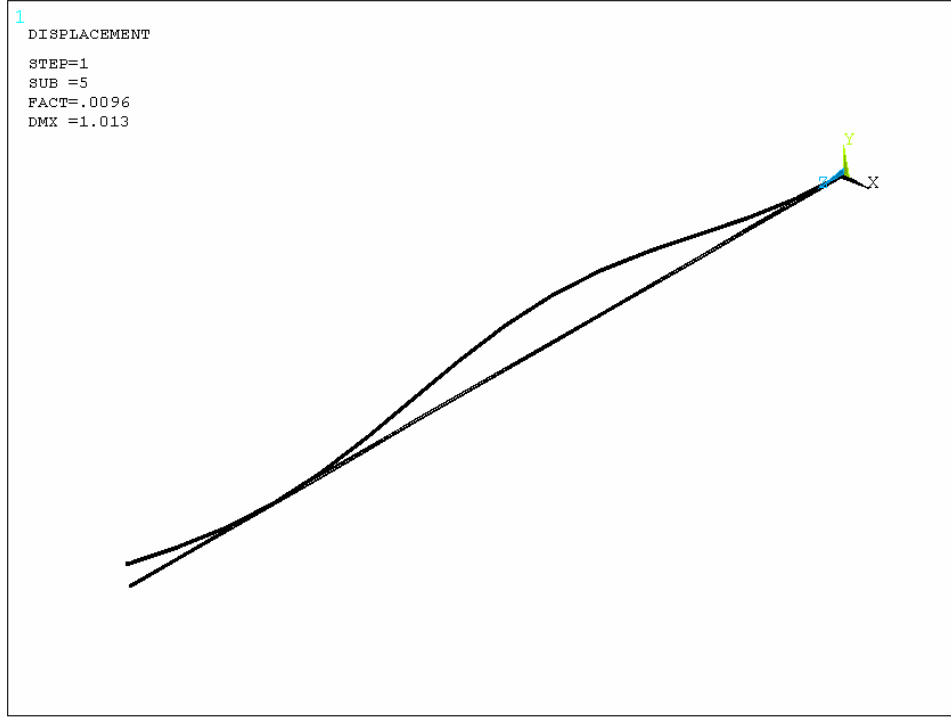
Şekil Ek M.2: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 2. mod şekli



Şekil Ek M.3: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 3. mod şekli



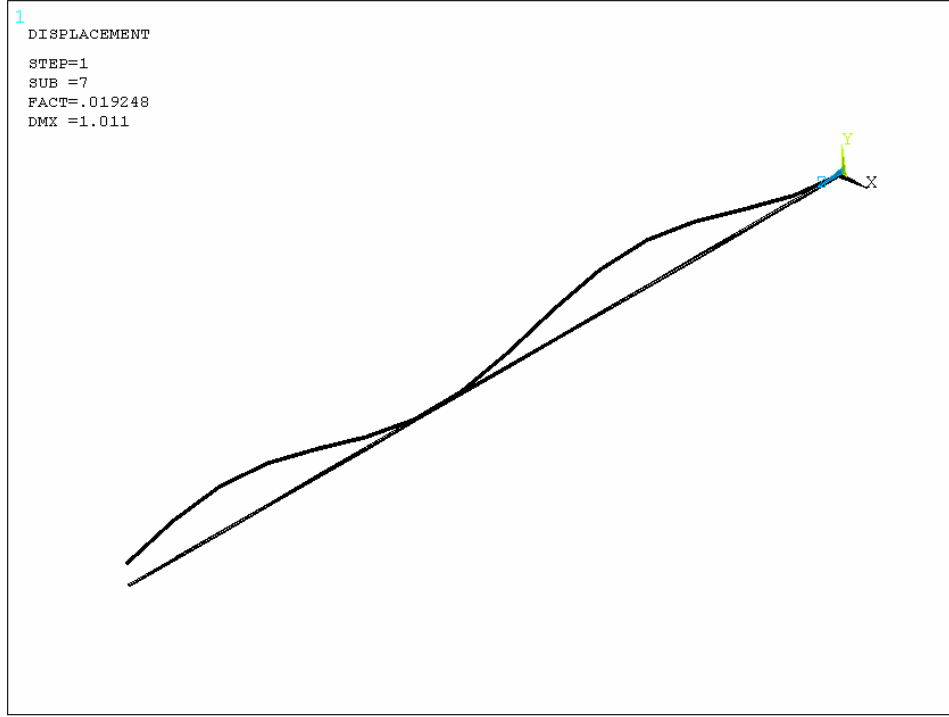
Şekil Ek M.4: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 4. mod şekli



Şekil Ek M.5: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 5. mod şekli



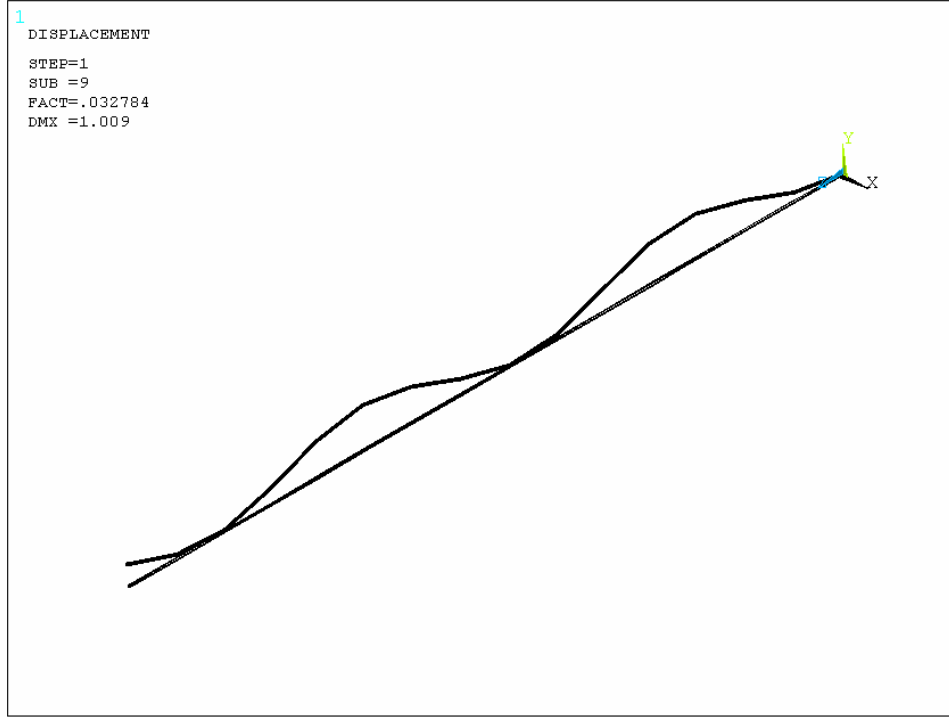
Şekil Ek M.6: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 6. mod şekli



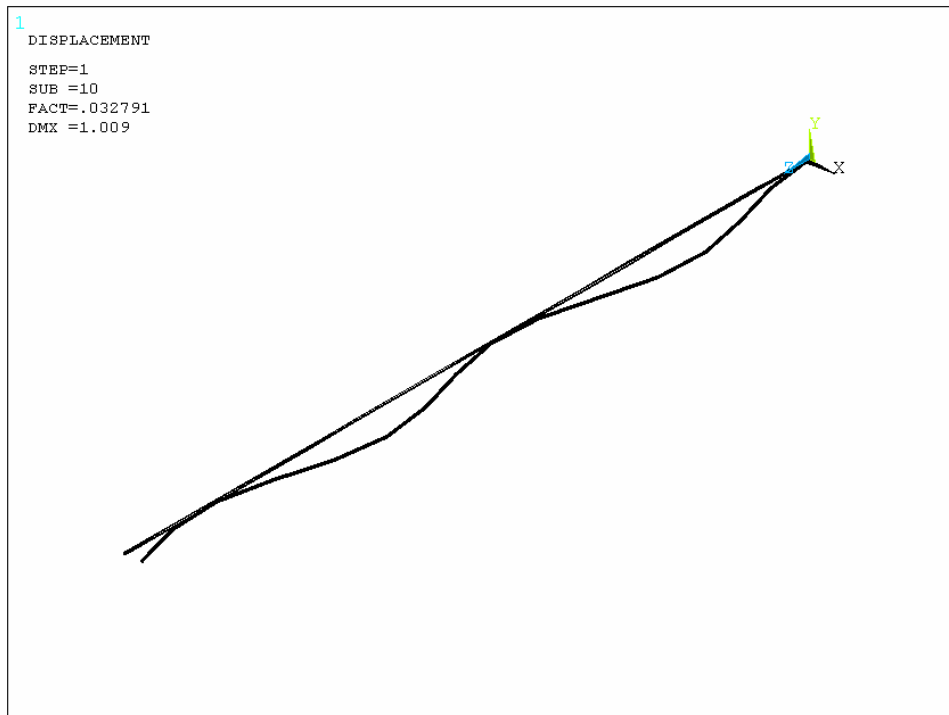
Şekil Ek M.7: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 7. mod şekli



Şekil Ek M.8: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 8. mod şekli



Şekil Ek M.9: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 9. mod şekli



Şekil Ek M.10: İzotropik malzeme kullanılarak yapılan karbon elyaf analizi 10. mod şekli

ÖZGEÇMİŞ

Bora Aksoylu, 1982 yılında İstanbul’da doğmuştur. 2000 yılında lisans eğitimine İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak mühendisliği programında başladıktan sonra, 2004 yılında mezun olmuştur. 2005 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İngilizce İşletme Yüksek lisans programını tamamlamıştır. Şu anda İstanbul Teknik Üniversitesinde Uçak-Uzay mühendisliği yüksek lisans programında tezini tamamlamaktadır.