

GENEL ENİYİLEME YÖNTEMİ KULLANILARAK UÇAK KANADININ DİNAMİK KARAKTERİNE UYGUN KİRİŞ-ÇUBUK MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Oğuzhan Köse¹ ve Murat Aydın²
ODTÜ, Havacılık ve Uzay Mühendisliği

Prof. Dr. Altan Kayran³
ODTÜ, Havacılık ve Uzay Mühendisliği

ÖZET

Kiriş-çubuk modeli genellikle 3 boyutlu sonlu elemanlar modelinin 1 boyuta düşürülmesinde kullanılmaktadır. Bu indirgenmiş modeller uçak üzerindeki yükleri tahmin etmede ya da uçağın dinamik karakteristiğini yansıtmada kullanılabilir. Bu çalışmada, genel eniyileme yöntemi kullanılarak AGARD 445.6 kanadının yapısal sonlu elemanlar modelinin ve ODTÜ Çok Hafif Uçağı'nın (VLA) kontrol yüzeyi içeren kanadının giriş-çubuk modeli oluşturulmuştur. Genel eniyileme yöntemi olarak karga arama algoritması kullanılmıştır. Oluşturulan giriş-çubuk modeli ile yapıların dinamik karakteristiklerinin örtüşmesi amaçlanmaktadır. Belirtilen iki yapının detaylı yapısal sonlu elemanlar modeli ile oluşturulan giriş-çubuk modelinin doğal frekans ve titreşim şekilleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmayı yapmak için NASTRAN sonlu elemanlar programının modal analiz çözücüsü kullanılmıştır.

GİRİŞ

Kiriş-çubuk model, karmaşık sonlu eleman modellerini basitleştirmede kullanılmaktadır. Bu modeller uçak tasarımının her fazında kullanılabilir. Örneğin uçak tasarımının ilk safhalarında birden fazla uçak konfigürasyonu aynı anda analiz edilmelidir. Her farklı konfigürasyon için detaylı bir sonlu eleman modeli oluşturmak çok zaman almaktadır. Kiriş-çubuk modelleri ufak değişikliklerle yeni konfigürasyona uygun hale getirilebilir. Hatta mevcut konfigürasyonda oluşan problemlerin çözümlerini bulmak amaçlı da kullanılabilir. Bu sayede, giriş modeller gelecek uçak konfigürasyonlarının tasarımlarında büyük rol oynarlar. Uçak tasarımının son safhasında ise, yer titreşim testlerinin sonuçları kullanılarak uçağın dinamik karakteristiği elde edilir. Yer titreşim testlerinden sonra uçağın dinamik karakteristiğini yansıtmak için giriş-çubuk modeller kullanılmaktadır. Ayrıca, karmaşık sonlu eleman modelleriyle doğrusal olmayan dinamik aeroelastisite analizlerinin süreleri yönetilebilir değildir. Bu sebeple, bu analizlerde giriş-çubuk model kullanmak neredeyse zorunludur. Bu bildiride, giriş-çubuk model oluşturmak için genel eniyileme yöntemi kullanılacaktır.

Literatürdeki ilk indirgenmiş model çalışmalarına baktığımızda, katılık ve kütle matrislerinin boyutlarını matematiksel metodoloji kullanılarak indirgenme yöntemlerini görüyoruz. Bu yöntemlerin en bilinenleri Guyan [Guyan,1965], IRS [O'Callahan,1989] ve modal indirgeme [Kammer, 1987] yöntemleridir. Bu üç matris indirgeme yöntemi Hayırlı ve Kayran'ın [Hayırlı ve Kayran, 2017] makalesinde karşılaştırılmıştır. IRS ve modal indirgeme yöntemlerinin Guyan

¹ Y. Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: oguzhan.kose@metu.edu.tr

² Y. Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: aydin.murat@metu.edu.tr

³ Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: akayran@metu.edu.tr

metoda göre daha iyi sonuç verdiği raporlanmıştır. Bu yöntemler karmaşık yapılar için elverişli değildir.

Literatürdeki kiriş-çubuk model ile ilgili çalışmalara baktığımızda, 2009 yılında Elsayed, Sedaghati ve Abdo [Elsayed, Sedaghati ve Abdo, 2009] tarafından geliştirilen yöntemde, kanat elastik eksenine göre hesaplanan katılık değerleri kullanılarak kiriş-çubuk model oluşturulmuştur. Oluşturulan kiriş-çubuk modeli sadece statik analizler için kullanılabilir. Daha sonra, 2011 yılında Cirillo [Cirillo, 2011] kiriş kesiti bünye denklemleri kullanarak özel jet için kiriş-çubuk model oluşturmuştur. Bu yöntemde hem statik hem de dinamik karakteristik kiriş-çubuk modellerle gösterilmiştir. Hem statik hem de dinamik karakterin tek bir kiriş-çubuk modelle gösterilmesi hata paylarını arttırmıştır.

GENEL ENİYİLEME VE KARGA ENİYİLEME YÖNTEMİ

Genel eniyileme yöntemi karmaşık ve türevlenemeyen problemler için kullanılan bir eniyileme yöntemidir. Genel eniyilemenin amacı, çoklu yerel optimum tasarım noktalarının varlığında (muhtemelen doğrusal olmayan) modellerin genel olarak en iyi çözümünü bulmaktır. Genel eniyileme, kısıtlı bir eniyileme modelinin genel çözümünü/çözümlerini arar. Doğrusal olmayan modeller, örneğin ileri mühendislik tasarımı, biyoteknoloji, veri analizi, çevre yönetimi, finansal planlama, süreç kontrolü, risk yönetimi, bilimsel modelleme ve diğerleri gibi birçok uygulamada her yerde bulunur. Çözümleri genellikle küresel bir arama yaklaşımı gerektirir. Popülarlığı gün ve gün artmaktadır. Bu durumun ana sebepleri, genel eniyileme metodunun gradyan bilgilerine ihtiyacı olmaması ve lokal en iyi noktasına takılı kalma ihtimalinin diğer eniyileme metotlarına göre düşük olmasıdır.

Kiriş-çubuk model oluşturulurken bir genel eniyileme metodu olan karga eniyileme algoritması kullanılmıştır. Karga eniyileme metodu optimum sonuçlara hızlı ulaşması, güvenilirliğini kanıtlamış bir metod olması ve kesin optimum noktasını bulmadaki becerisi nedeni ile tercih edilmiştir.

Alireza Askarzadeh [Askarzadeh, 2016] tarafından geliştirilen Karga eniyileme metodu, optimizasyon problemini çözmek için kullanılan yeni bir sürü zekâsı meta-sezgisel eniyileme algoritmasıdır. Bu optimizasyon algoritması temel fikrini kargaların hafıza yeteneklerine, iletişim becerilerine ve yiyecek saklamaya yönelik sosyal davranışlarına dayandırır. Algoritmanın kargalardan esinlenen davranışları aşağıda listelenmiştir.

1. Kargalar yüzleri unutmazlar. Bu sebeple güçlü bir hafızaları vardır.
2. Kargalar sakladıkları yiyecek yerlerinin konumunu ezberler. Aylar geçse bile bu konumu unutmazlar.
3. Kargalar her zaman daha verimli bir yiyecek bölgesi ararlar. Bundan dolayı, başka bir karganın yiyeceğini çalmak için birbirlerini takip ederler.
4. Kargalar zeki hayvanlardır. Takip edildiklerini anlarlar ise yiyeceklerini diğer kargalardan korumak için rastgele bir bölgeye uçarlar. Ancak, rastgele bir bölgede daha verimli bir yiyecek bölgesi bulma olasılıkları vardır. Bu durum karga arama algoritmasının temelini oluşturur.

Öncelikle, kargaların konumunu belirleyen bir P matrisine ihtiyaç vardır. Bu matrisin boyutu sürü boyutu (N), X tasarım değişkenleri sayısı (d) olmalıdır. Bir anlamda d-boyutlu bir ortamımız varmış gibi düşünülebilir. Her bir tasarım değişkeni kargaların pozisyonlarının koordinatlarıdır. İkinci olarak bir hafıza matrisine (M) ihtiyaç vardır. Bu matris kargaların o anki yineleme sayısına kadar ki en iyi yemek bölgesinin konumunu saklar. Bu matris kargaların devasa hafızalarını temsil eder. Amaç fonksiyonu yemek bölgesinin verimliliğini temsil eder. Bu karga davranışlarının koda nasıl uygulandığı aşağıda anlatılmıştır.

- t yinelemede her karga i'nin konumunu temsil eden konum matrisi P
- Saklanma yerleri konumlarının saklandığı bellek matrisi M oluşturulmalıdır.

Algoritmada iki senaryo gerçekleşebilir.

Senaryo 1: Karga j, ardından karga i'nin geldiğini fark etmez. Karga j rastgele seçilmektedir. Sonuç olarak karga i, karga j'nin saklanma yerine yaklaşacaktır ve karga i'nin yeni güncellenmiş konumu Denklem 1'de verilmiştir:

$$P_i^{t+1} = P_i^t + r_i * fl_i^t * (M_j^t - P_i^t) \quad (1)$$

P_i = Karga i'nin pozisyonu

fl_i = Karga i'nin uçuş uzunluğunu belirtir.

r_i = Düzgün bir dağılıma sahip 0 ile 1 arasından seçilen rastgele sayı.

M_j = Karga j'nin hafıza matrisi (Kargaların o anki yineleme sayısına kadar ki en iyi pozisyonu)

t = Yineleme sayısı

fl değeri kargaların arama kabiliyetini etkiler. fl 'nin büyük değerleri global aramaya, küçük değerleri ise yerel aramaya yol açmaktadır [Askarzadeh, 2016].

Senaryo 2: Karga j, karga i'nin onu takip ettiğini fark eder. Sonuç olarak karga j, arama uzayının başka bir rastgele konumuna giderek karga i'yi aldatacaktır. Karga i'nin konumu rastgele belirlenir. Senaryo 1 ve senaryo 2 sırasıyla Denklem 2 ve Denklem 3'te gösterilmiştir.

$$P_i^{t+1} = P_i^t + r_i * fl_i^t * (M_j^t - P_i^t); \quad \text{Eğer, } r_j \geq AP \quad (2)$$

$$P_i^{t+1} = \text{Rastgele bir pozisyon}; \quad \text{Eğer, } r_j \leq AP \quad (3)$$

AP , t yinelemesinde j kargasının farkındalık olasılığını belirtir. AP 'nin büyük değerleri çeşitlenmeyi artırırken, küçük değerler yoğunlaşmayı artırır. AP , keşif ve kullanım arasındaki dengeyi kontrol eder.

Kargalar hafızalarını Denklem 4 veya Denklem 5'e uygun olarak günceller.

$$M_i^{t+1} = P_i^{t+1}; \quad \text{Eğer } f(P_i^{t+1}), f(P_i^t)'den \text{ daha iyiyse}; \quad (4)$$

$$M_i^{t+1} = M_i^t; \quad \text{Eğer } f(P_i^{t+1}), f(P_i^t)'den \text{ daha iyi değilse}; \quad (5)$$

$f()$ fonksiyonu amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. Bu metodun özet algoritması Şekil 1'de verilmiştir.

Algoritma: Karga Arama Algoritması	
1:	Arama alanındaki N karga sürüsünün konumunu rastgele başlat
2:	Kargaların konumunu değerlendirme
3:	Her karganın hafızasını başlatma
4:	while iter < iter _{max}
5:	for i = 1 : N (sürünün tüm N kargaları)
6:	Takip edilecek kargalardan birini rastgele seçme (örneğin j)
7:	Bir farkındalık olasılığı tanımlama
8:	if $r_j \geq AP^{iter}$
9:	$x^{i,iter+1} = x^{i,iter} + r_i \times fl_i^{iter} \times (m^{j,iter} - x^{i,iter})$
10:	else
11:	$x^{i,iter+1} =$ arama uzayında rastgele bir pozisyon
12:	end if
13:	end for
14:	Yeni pozisyonların fizibilitesini kontrol etme
15:	Kargaların yeni konumunu değerlendirme
16:	Kargaların hafızasını güncelleme
17:	end while

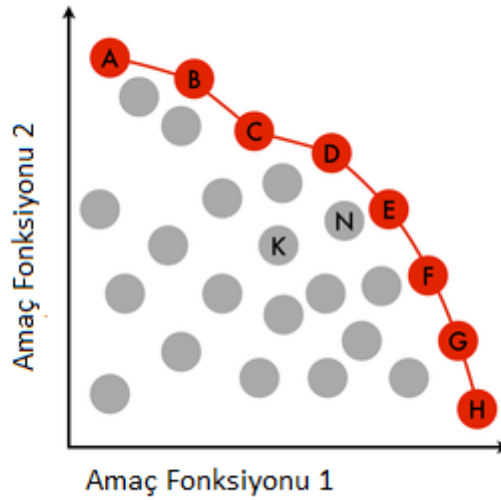
Şekil 1: Karga Arama Algoritması [Baş, 2022]

GÜNCELLENEN KARGA ENİYİLEME YÖNTEMİ

Birden fazla amaçlı optimizasyon problemi için, her bir amacı aynı anda optimize eden tek bir çözüm yoktur. Bu durumda, amaç fonksiyonlarının çelişkili olduğu söylenir. Eğer hiçbir amaç fonksiyonunun değeri, diğer amaç değerleri kötüleşmeden iyileşmiyorsa bu duruma Pareto optimal denir.

Ek öznel tercih bilgisi olmadan, tümü eşit derecede iyi kabul edilen (muhtemelen sonsuz) sayıda Pareto optimal çözümü olabilir. Araştırmacılar, çok amaçlı optimizasyon problemlerini farklı bakış açılarından inceler ve bu nedenle, bunları belirlerken ve çözerken farklı çözüm felsefeleri ve hedefleri vardır. Amaç, temsili bir Pareto optimal çözüm kümesi bulmak ve/veya farklı hedeflerin karşılanmasındaki ödünleşimleri ölçmek ve/veya bir insan karar vericinin öznel tercihlerini karşılayan tek bir çözüm bulmak olabilir.

Orijinal karga eniyileme yöntemi tek amaç fonksiyonu içermektedir. Kiriş-çubuk modelinde iki adet amaç fonksiyonu olması gereklidir. Bunlar Modal Güvence Kriteri [Ewins ve Walker, 2001] (MAC) ve frekans oranlarını içeren amaç fonksiyonlarıdır. Algoritma iki adet amaç fonksiyonu için Pareto optimal metodu eklenerek kod güncellenmiştir.



Şekil 2: Pareto Optimal Algoritması [Pareto Front 2021]

Pareto optimal algoritmasının asıl mantığı, birbirlerine üstünlük sağlamayan durumların bir araya getirilip seçim şansının artırılmasıdır. Şekil 2'de görüldüğü üzere kırmızı daireler, gri dairelere üstünlük sağlamış fakat birbirlerine sağlayamamıştır. Bu durumda her biri kullanıcı için en iyi sonuç olabilir. Bu durumda seçim kullanıcıya bırakılmıştır.

Algoritmaya eklenen bir diğer özellik ise değişken farkındalık özellikleri (AP)'dir. AP yineleme sayısı atması ile git gide azalmaktadır. Bunun ana sebebi, iterasyon sayısı arttıkça kargalar verimli bölgeye yaklaşmaktadır. Bu durum gerçekleştiğinde, AP'nin azalması rastgele arama oranını azaltıp verimli bölgeye odaklanmayı sağlamaktadır. Bu değişiklik ile çok daha düşük yineleme sayılarında sonuçların optimum noktaya ulaştığı görülmüştür.

YÖNTEM

Bir sistemin dinamik karakteristiğini etkileyen iki önemli faktör sistemin kütlesi ve sahip olduğu katılığıdır. Denklem 6, serbest titreşim hareketi yapan bir sistemin hareket denklemini göstermektedir. Denklem 6'da K sistemin katılık matrisini, M ise sistemin kütle matrisini temsil etmektedir.

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = 0 \quad (6)$$

Bu çalışmada, genel eniyileme yöntemi kullanıldığı için tasarım değişkenlerine ve amaç fonksiyonuna ihtiyaç bulunmaktadır. Katılık matrisini değiştiren parametreler tasarım değişkeni olarak kullanılabilir. Bu bildiride elastisite modülü, kayma modülü, kiriş elemanlarının atalet momentleri, kiriş elemanlarının kesit alanları tasarım değişkeni olarak kullanılmıştır. Kullanılan kiriş-çubuk modelindeki teori Euler-Bernoulli kiriş modelidir [MSC. Nastran, 2018].

Euler-Bernoulli kiriş teorisi kirişlerin yük taşıma ve sapma özelliklerini hesaplamanın bir yolunu sağlayan doğrusal elastisite teorisinin basitleştirilmiş halidir. Yalnızca yanal yüklere maruz kalan bir kirişin küçük sehimlerine karşılık gelen durumu kapsar. Kayma deformasyonu ve döner atalet etkileri göz ardı edilmiştir, bu nedenle Timoshenko kiriş teorisinin özel bir durumudur.

Kütle matrisi ise eniyileme koduna girdi olarak verilmiştir. Verilen kütle matrisi girdisi şu şekilde hazırlanmıştır.

Öncelikle yapının öz kütle bazlı bir sistemden parçalı kütle sistemine çevrilmesi gereklidir. Bulunan parçalı kütleler kiriş-çubuk modelin düğüm noktalarına bağlanmıştır. NASTRAN yardımıyla oluşturulan kiriş-çubuk modelin kütle matrisi çıktı olarak alınmıştır. Bu kütle matrisi doğrudan eniyileme koduna girdi olarak verilmiştir. Bir sistemin dinamik karakterini doğru şekilde temsil edebilmek için doğal frekans ve titreşim şekillerinin sistemin aslı ile uyuşması gerekmektedir. Bu bağlamda, genel eniyileme yönteminin amaç fonksiyonları aşağıda belirtildiği gibi tanımlanmıştır.

Karga eniyileme algoritmasında iki adet amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Bu amaç fonksiyonları modal güvence kriteri ve doğal frekans oranı ile alakalıdır. Modal güvence kriteri ile alakalı olan amaç fonksiyonu Denklem 9'da gösterilmiştir. Bu örnekte kolay anlaşılması açısından tek MAC değeri hesaba katılmıştır. Eğer birden fazla MAC değeri hesaba katılacaksa, formüle aynı şekilde eklenmelidir.

$$f(1) = (|1 - MAC(1)|) \quad (7)$$

$$p(1) = \text{minimum}(0, MAC(1) - 0.90)^2 \quad (8)$$

$$\text{Amaç Fonksiyonu}(1) = f(1) * (1 + c(1) * p(1)) \quad (9)$$

Denklem 12 ise doğal frekans ile alakalı olan amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. Bu örnekte kolay anlaşılması açısından tek doğal frekans değeri hesaba katılmıştır. Frekans oranı tanımlaması, karmaşık sonlu elemanlar modelindeki frekansının, optimizasyon yinelemesi anında çıkan frekansa oranını ifade etmektedir. Eğer birden fazla frekans oranı değeri hesaba katılacaksa, formüle aynı şekilde eklenmelidir.

$$f(2) = (|1 - Frekans_Oranı(1)|) \quad (10)$$

$$p(2) = \text{minimum}(0, Frekans_Oranı(1) - 0.90)^2 + \text{minimum}(0, 1.10 - Frekans_Oranı(1))^2 \quad (11)$$

$$\text{Amaç Fonksiyonu}(2) = f(2) * (1 + c(2) * p(2)) \quad (12)$$

Amaç fonksiyonları iki parçadan oluşmaktadır. Bunlar $f()$ ve $p()$ fonksiyonlarıdır. $f()$ fonksiyonunun amacı MAC ve frekans oranını en iyi değer olan 1 değerine yaklaştırmaktır. $p()$ fonksiyonunun amacı ise frekans ve MAC değerlerinin verilen sınır değerlerinin dışına çıkmasını engellemek için penaltı değeri oluşturmaktır. Penaltı fonksiyonunda $c(1)$ ve $c(2)$ kat sayılarını direkt olarak belirlemek mümkün değildir. Sınır koşulunu sağlamanın zorluğuna ve sınır koşulunun önemine dayalı olarak tahmin edilmelidir veya deneysel olarak belirlenmelidir [Smith ve Coit, 1995].

Güncellenen Karga Eniyileme Algoritması bölümünde bahsedilen Pareto optimal algoritması uygulandıktan sonra birbirlerine üstünlük sağlayamayan adaylar arasından seçim yapılması gereklidir. Aşağıda belirtilen durumların herhangi birine uyan adaylar kabul edilmiş ve hafıza matrisi buna göre güncellenerek bir sonraki yineleme aşamasına geçilmiştir.

Durum 1

Her iki amaç fonksiyonu da karganın hali hazırdaki en iyi değerlerinden daha iyi;

Kabul et.

Durum 2

Eğer karganın hali hazırdaki ve yeni hesaplanan $p(2) = 0$; ve

Karganın hali hazırdaki $p(1) > 0$; ve

Amaç Fonksiyonu(1) değeri karganın hali hazırdaki en iyi değerinden daha iyi;

Kabul et.

Durum 3

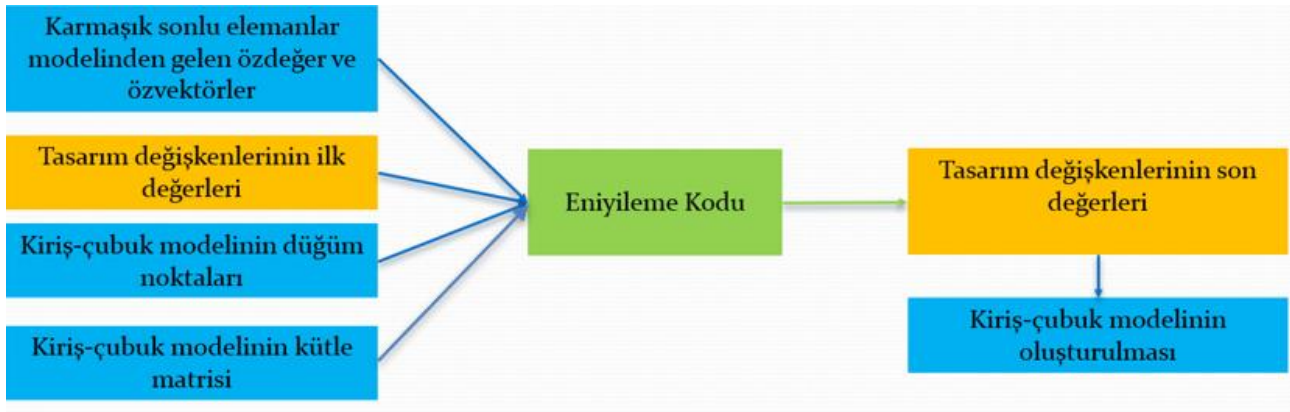
Eğer karganın hali hazırdaki ve yeni hesaplanan $p(1) = 0$; ve

Karganın hali hazırdaki $p(2) > 0$; ve

Amaç Fonksiyonu(2) değeri karganın hali hazırdaki en iyi değerinden daha iyi;

Kabul et.

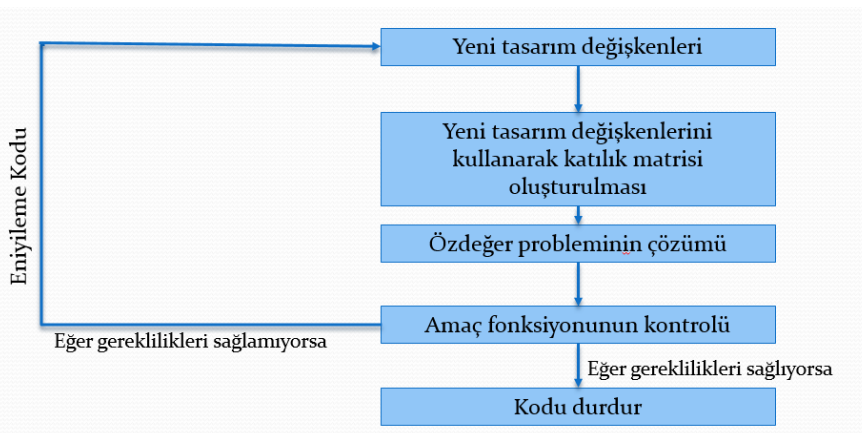
Uygulanan yöntemin akım şeması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Metod Akış Şeması

Mavi renkli kutuların içindeki işlemler NASTRAN ortamı kullanılarak yapılmaktadır. Yeşil renkli kutudaki eniyileme kodu MATLAB ortamında geliştirilmiştir.

Eniyileme kodunun daha detaylı akış şeması Şekil 4'te verilmiştir.

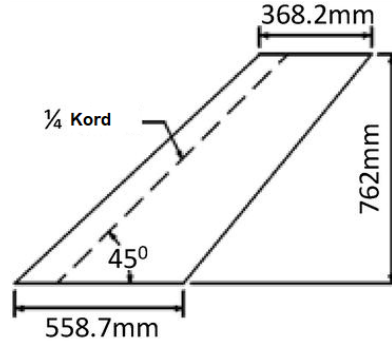


Şekil 4: Eniyileme Kodu Akış Şeması

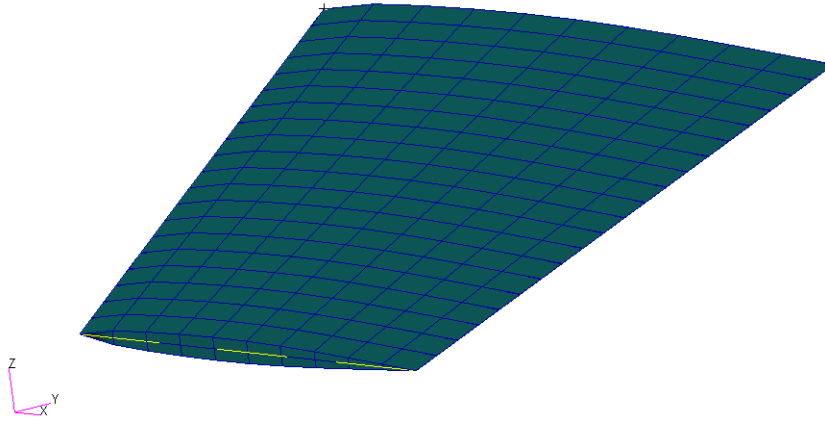
UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

AGARD 445.6 Kanadının Kiriş-Çubuk Modelinin Oluşturulması

Bu kısımda güncellenen karga arama algoritması ile oluşturulan kiriş-çubuk model ile AGARD 445.6 [Yates ve Carson, 1987] kanadının dinamik karakteristiği yansıtılmaya çalışılmıştır. Oluşturulan çubuk-kiriş modelinin doğal frekansları ve titreşim şekilleri AGARD 445.6'nın doğal frekans ve titreşim şekilleri ile karşılaştırılmıştır. Bu sayede, sistemin aslına uygunluğu test edilmiştir. AGARD 445.6 modelinin detaylı sonlu elemanlar modeli, www.cfd4aircraft.com sitesindeki çalışmadan alınmıştır. Şekil 5, Şekil 6 ve Tablo 1'de AGARD 445.6 kanadı ile ilgili bilgiler verilmiştir.



Şekil 5: AGARD 445.6 Geometrik Özellikleri



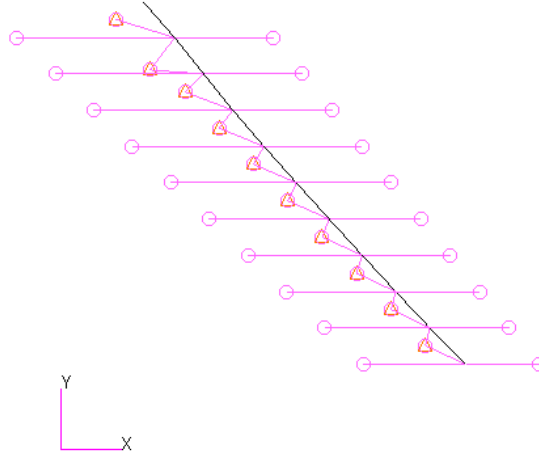
Şekil 6: AGARD 445.6 Sonlu Elemanlar Modeli

Parametre	Değer
Boyuna Elastisite Modülü	3.15 GPa
Yanal Elastisite Modülü	0.42 GPa
Kayma Modülü	0.44 GPa

Tablo 1: AGARD 445.6 Malzeme Özellikleri

Oluşturulan kiriş-çubuk model Şekil 7'deki gibidir. Şekil 7'deki siyah elemanlar kirişleri temsil etmektedir. Turuncu üçgen elemanlar ise parça kütleleri temsil etmektedir. Parçalı kütle ile kiriş

elemanları birbirlerine mor renkli RBE3 elemanları ile bağlanmıştır. Kirişlerden hücum kenarına ve firar kenarına uzanan mor elemanlar ise RBE2 elemanlarıdır. RBE2 elemanları rijit elemanlardır ve birçok dinamik analizinde kullanılan akışkan-katı etkileşimini iyileştirmek için modele eklenmiştir. Kiriş-çubuk modelin kiriş üzerindeki düğümleri elastik eksen üzerinden geçmektedir.



Şekil 7: Kiriş-Çubuk Modeli

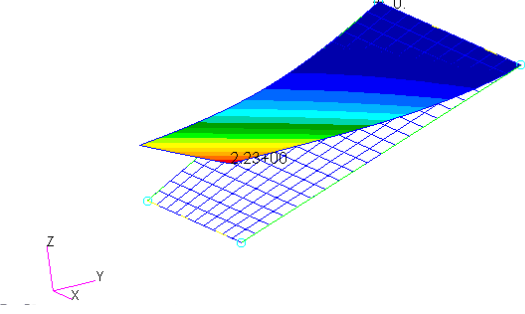
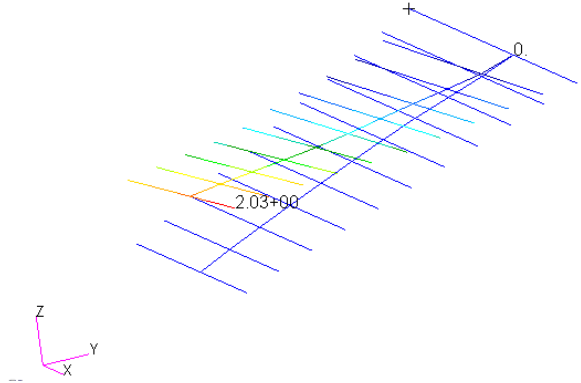
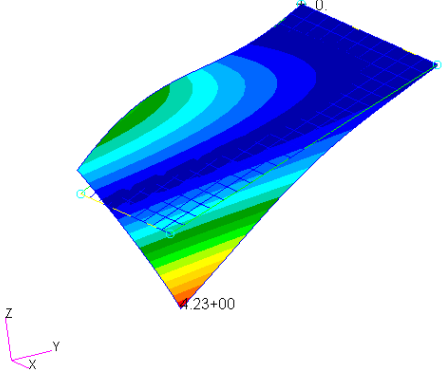
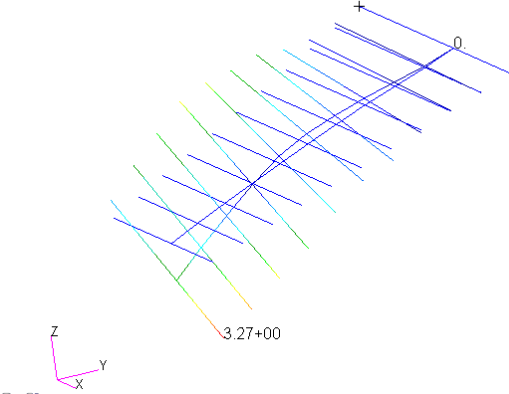
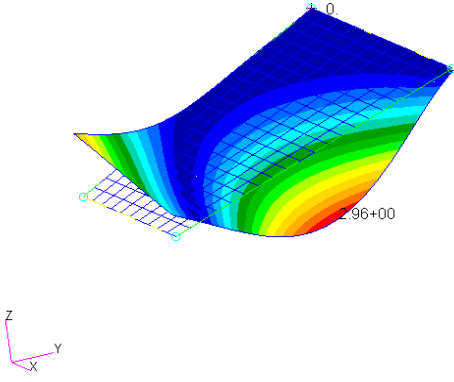
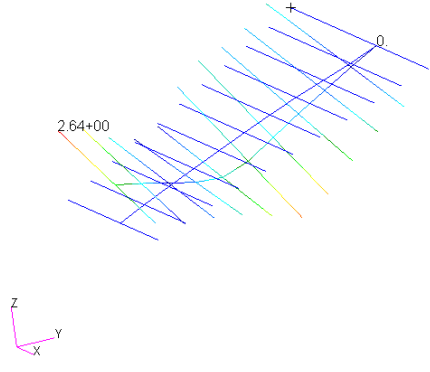
Tablo 2'de iki amaçlı optimizasyon probleminin çözümü sonunda kiriş-çubuk model için elde edilen ilk dört modun modal güvence kriterleri verilmiştir.

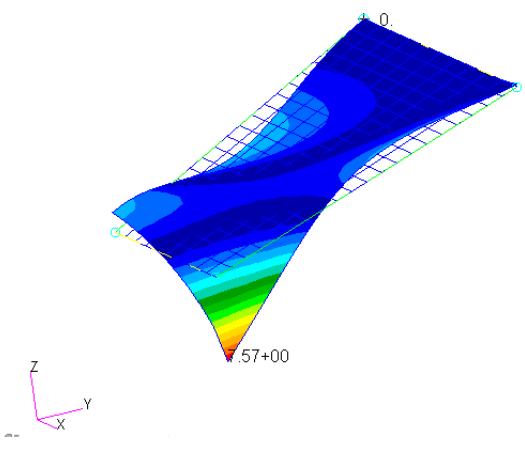
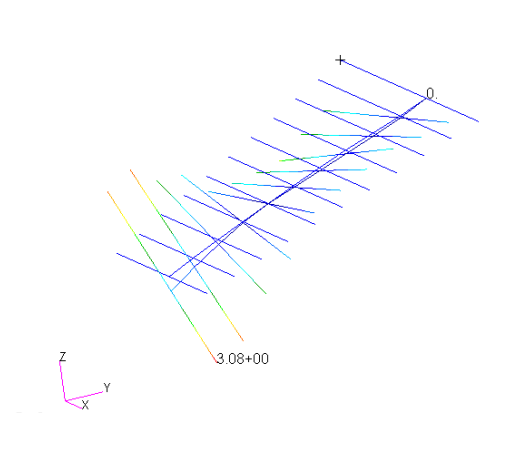
	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4
MAC	0.964	0.921	0.905	0.906

Tablo 2: Mod Şekillerinin Karşılaştırılması

MAC değerleri amaçlandığı gibi %90'ın üzerinde elde edilmiştir.

Karmaşık sonlu elemanlar modelinin ve kiriş-çubuk modelinin titreşim biçimlerinin karşılaştırılması Tablo 3'te verilmiştir.

Mod 1: Birinci Eğilme	
Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli	Kiriş-Çubuk Modeli
	
Mod 2: Birinci Burulma	
Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli	Kiriş-Çubuk Modeli
	
Mod 3: İkinci Eğilme	
Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli	Kiriş-Çubuk Modeli
	

Mod 4: İkinci Burulma	
Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli	Kiriş-Çubuk Modeli
	

Tablo 3: Titreşim Şekillerinin Karşılaştırılması

Tablo 4'te karmaşık sonlu elemanlar modeli ile kiriş-çubuk modelinin doğal frekansları karşılaştırılmıştır.

Mod Tanımı	Detaylı Model Frekans [Hz]	Kiriş-çubuk Model Frekans [Hz]	Hata Payı [%]
Birinci eğilme	9.46	9.45	0.11
Birinci burulma	39.70	38.58	2.82
İkinci eğilme	49.45	53.4	7.99
İkinci burulma	95.10	91.18	4.12

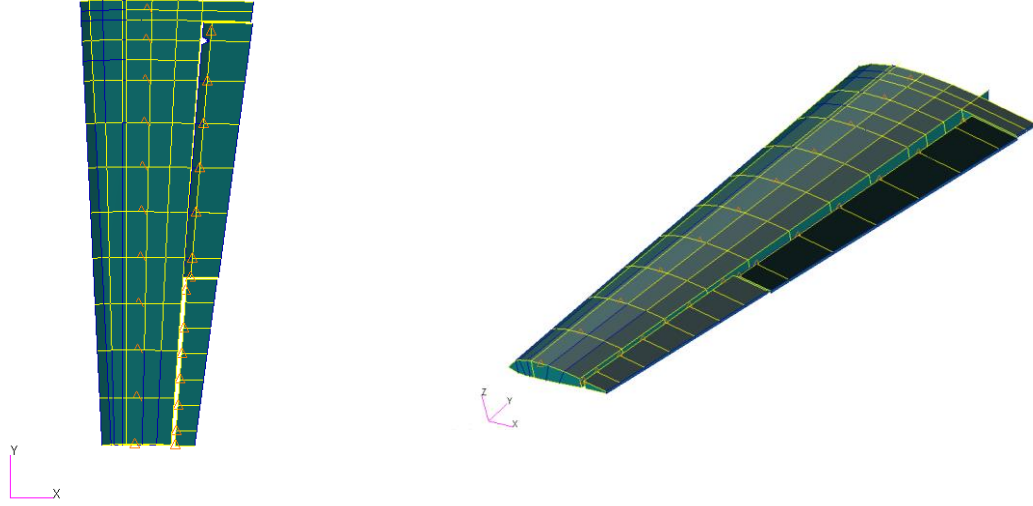
Tablo 4: Doğal Frekansların Karşılaştırılması

Tablo 4'te doğal frekanslardaki hata payının yüzde 10'un altında olduğu görülmektedir.

ODTÜ VLA Kanadının Kiriş-Çubuk Modelinin Oluşturulması

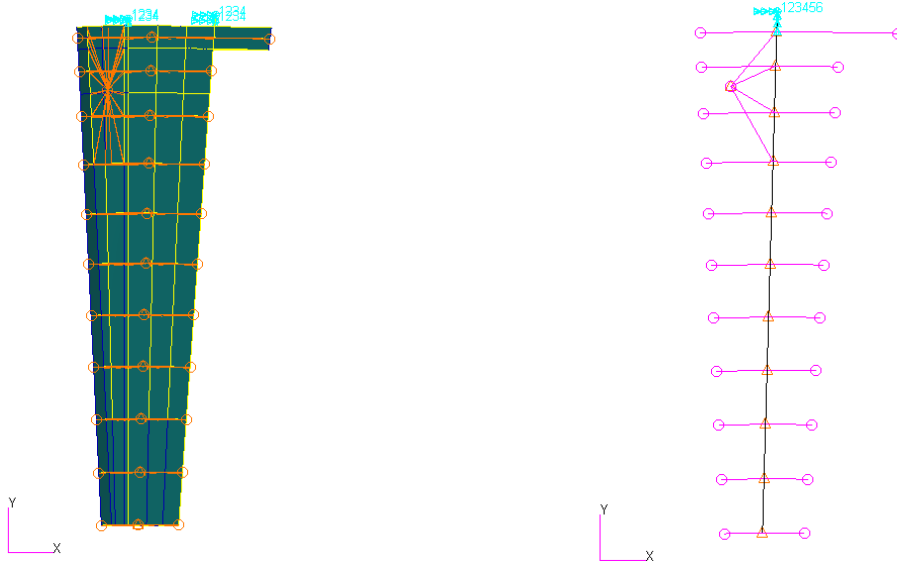
Bu bölümde model olarak ODTÜ VLA uçağının, kanatçık ve flap içeren kanadı kullanılmıştır. ODTÜ VLA uçağı, ODTÜ ve Türk Havacılık ve Uzay Sanayii iş birliğinde yürütülen bir projedir. Uçak, ODTÜ lisans öğrencileri tarafından tasarlanıyor. Türk Havacılık ve Uzay Sanayii ise projeye danışmanlık yapıyor.

Yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8: ODTÜ VLA Kanadı

Kanat modeli ana olarak 3 parçadan oluşmaktadır. Bunlar flap, kanatçık ve hücum kenarı hücrelerini içeren kanat tork kutusudur. Metodoloji olarak bu parçalarının hepsinin ayrı ayrı kiriş çubuk modeli çıkarılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, ilk olarak kanat tork kutusu ankastre sınır koşulunda izole olarak ankastre sınır koşulunda modellemiştir (Şekil 9). Kiriş-çubuk modelin düğümleri elastik eksen üzerindedir.



Şekil 9: İzole Kanat Tork Kutusu

İzole kanat modeli için yapılan dinamik karakteristik karşılaştırması Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.

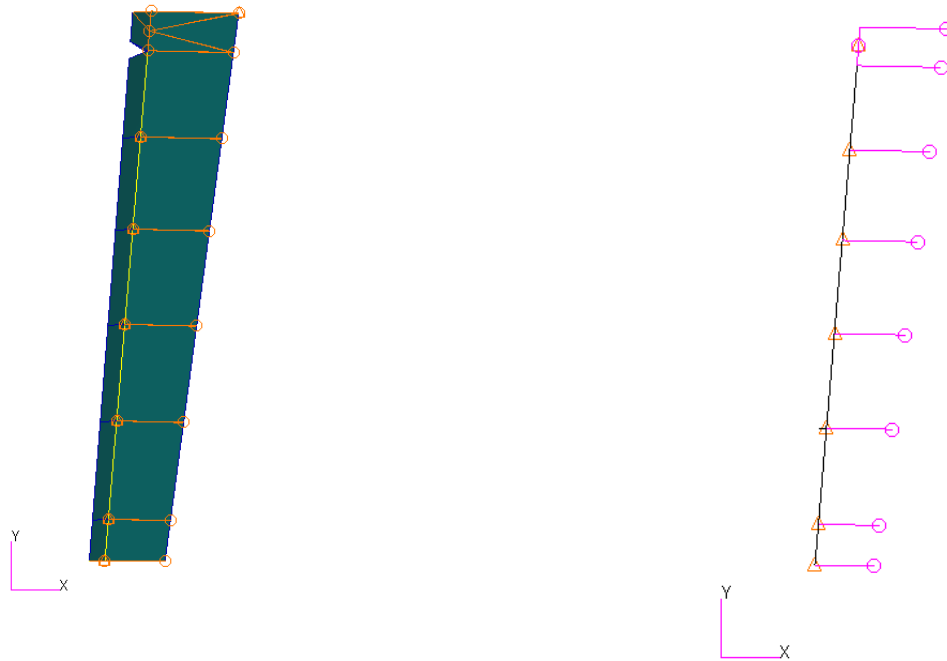
Mod Tanımı	Detaylı Model Frekans [Hz]	Kiriş-çubuk Model Frekans [Hz]	Hata Payı [%]
Birinci eğilme	15.37	15.37	0.01
İkinci eğilme	59.38	58.21	1.97
Birinci burulma	99.50	101.4	1.96

Tablo 5: Doğal Frekansların Karşılaştırılması

	Mod 1	Mod 2	Mod 3
MAC	0.999	0.992	0.977

Tablo 6: Mod Şekillerinin Karşılaştırılması

İkinci aşama olarak kontrol yüzeyleri serbest-serbest sınır koşulunda modellenmiştir. Flap örnek olarak Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10: İzole Flap için Üç Boyutlu ve Kiriş-Çubuk Modelleri

İzole flap modeli için yapılan dinamik karakteristik karşılaştırması Tablo 7 ve Tablo 8'de verilmiştir. Tablolarda ilk altı rijit gövde modundan sonraki iki elastik mod konulmuştur.

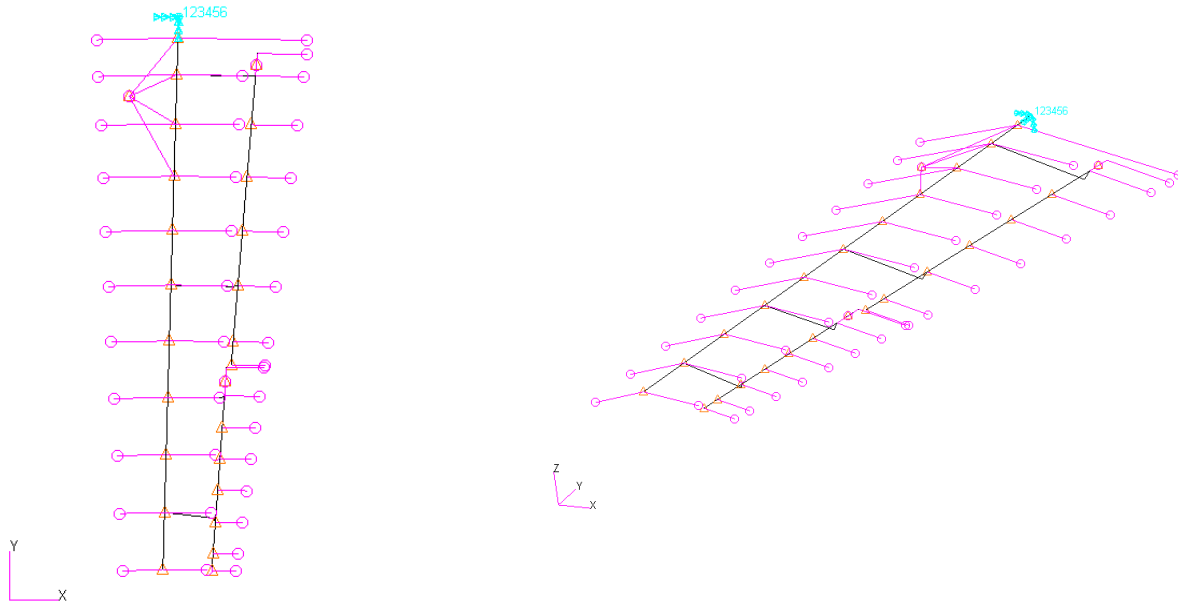
Mod Tanımı	Detaylı Model Frekans [Hz]	Kiriş-çubuk Model Frekans [Hz]	Hata Payı [%]
Birinci eğilme	80.17	81.22	0.32
İkinci eğilme	185.05	183.66	0.75

Tablo 7: Doğal Frekansların Karşılaştırılması

	Mod 1	Mod 2
MAC	0.9998	0.9997

Tablo 8: Mod Şekillerinin Karşılaştırılması

Kanatçık için de flap ile benzer bir çalışma yapılmıştır. Sonrasında, bu modeller bağlantı kirişleri kullanılarak menteşe eksenleri üzerinde birleştirilmiştir. Oluşan son model için ise sadece bağlantı kirişlerinin yapısal değerlerini bulmak için optimizasyon kodu çalıştırılmış ve sonuçlar alınmıştır. Bağlantı kirişleri dışındaki kirişlerinin yapısal değerleri izole modellerden elde edilen değerler olarak direkt kullanılmıştır. Şekil 11'de oluşturulan giriş-çubuk modeli gösterilmiştir.

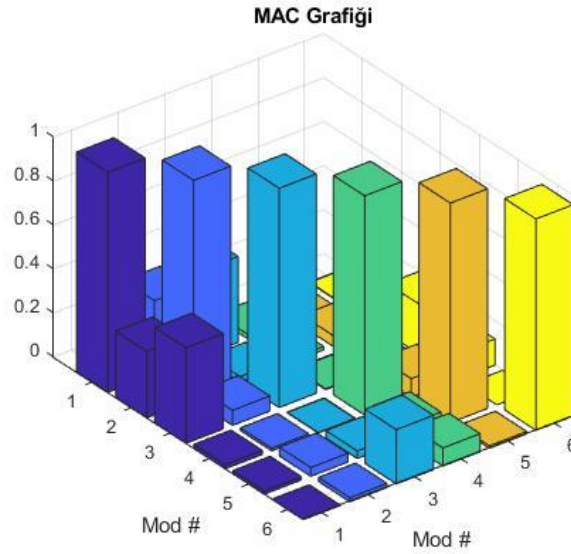


Şekil 11: ODTÜ VLA Kanadı Kiriş Çubuk Modeli

Tablo 9 ve Şekil 12’de oluşturulan kiriş çubuk model ile detaylı sonlu elemanlar modelinin mod şekillerinin karşılaştırılması verilmiştir.

	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5	Mod 6
MAC	1.000	0.998	0.996	0.997	0.998	0.961

Tablo 9: Mod Şekillerinin Karşılaştırılması



Şekil 12: MAC Grafiği

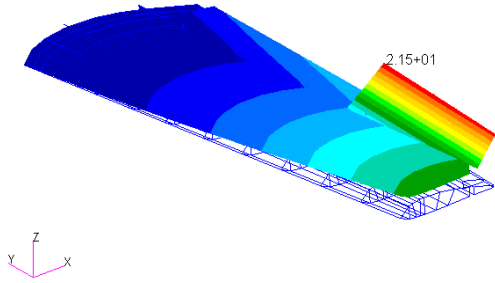
Tablo 9’den da görülebileceği üzere modelin ilk 6 modu asgari hatayla bulunmuştur. Titreşim biçimlerinin eşleştiği görülmektedir. Tablo 10’da doğal frekans oranlarını göstermektedir. Tablo 11’de titreşim biçimleri karşılaştırıldığında oldukça benzer oldukları görülebilmektedir.

	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5	Mod 6
Sonlu Elemanlar Modeli [Hz]	13.401	18.213	19.243	56.677	69.861	90.644
Kiriş-Çubuk Modeli [Hz]	13.432	18.224	19.174	55.286	70.095	93.382
Hata Payı [%]	0.231	0.060	0.359	2.454	0.335	3.021

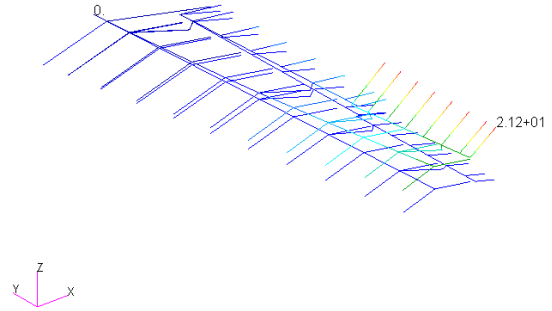
Tablo 10: Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli- Kiriş Çubuk Modeli Doğal Frekans Karşılaştırması

Mod 1: Kanatçık Rotasyon- Kanat Birinci Eğilme

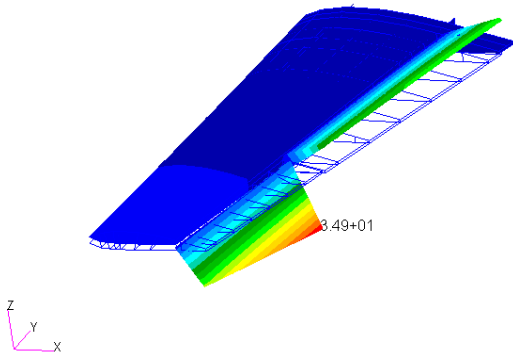
Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli



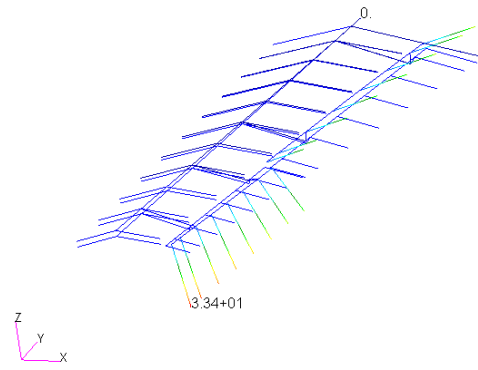
Kiriş-Çubuk Modeli

**Mod 2: Kanatçık & Flap Rotasyon (Faz Dışı)**

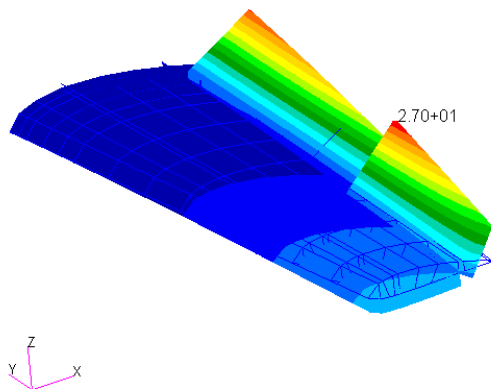
Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli



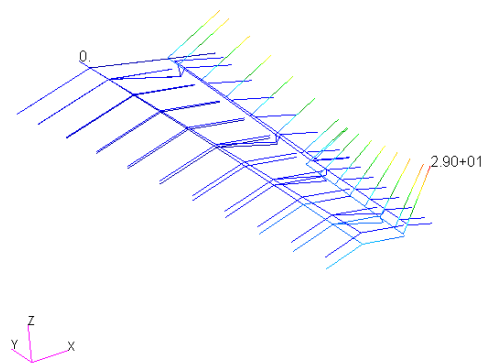
Kiriş-Çubuk Modeli

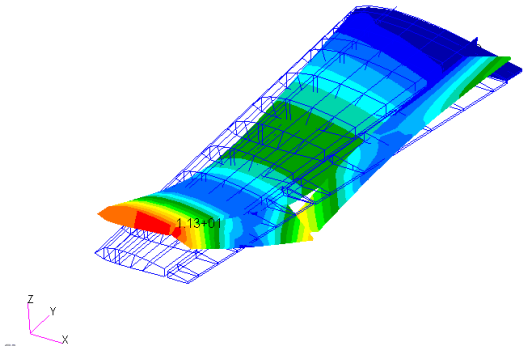
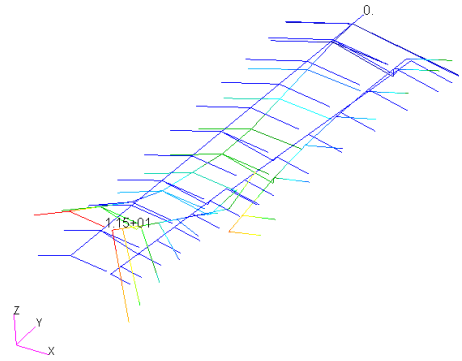
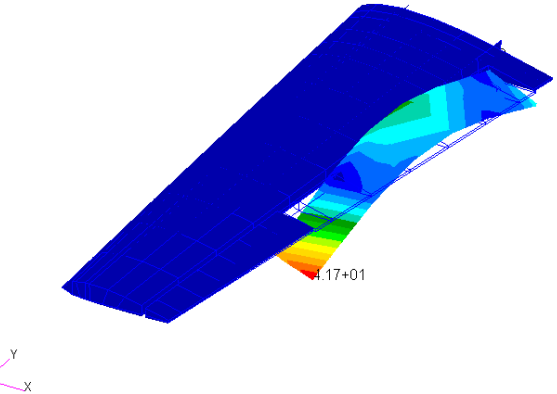
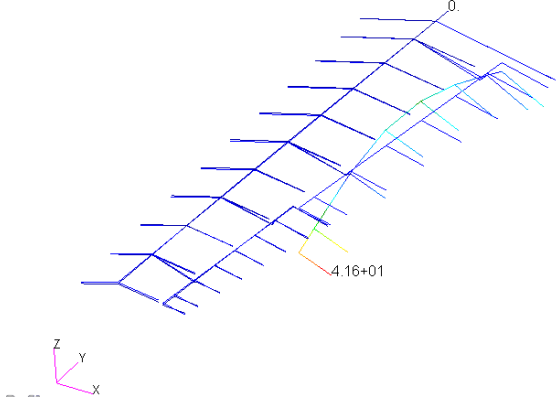
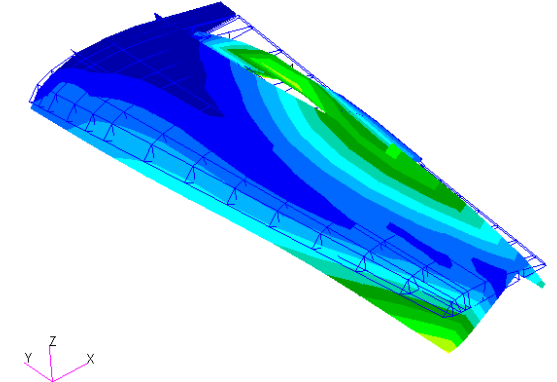
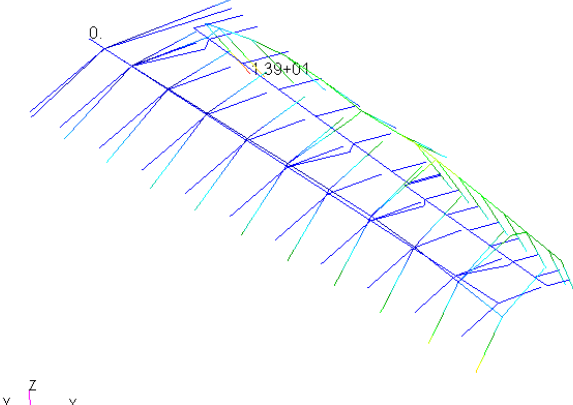
**Mod 3: Kanatçık & Flap Rotasyon (Eş Fazlı)**

Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli



Kiriş-Çubuk Modeli



Mod 4: Kanat İkinci Eğilme	
Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli	Kiriş-Çubuk Modeli
	
Mod 5: Flap Birinci Eğilme	
Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli	Kiriş-Çubuk Modeli
	
Mod 6: Kanat Birinci Burulma- Kanatçık & Flap Rotasyon (Faz Dışı)	
Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli	Kiriş-Çubuk Modeli
	

Tablo 11: Kiriş-Çubuk Modeli ve Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli Titreşim Biçimleri

Kütle Değişiklerine Yapının Verdiği Tepkinin İncelenmesi

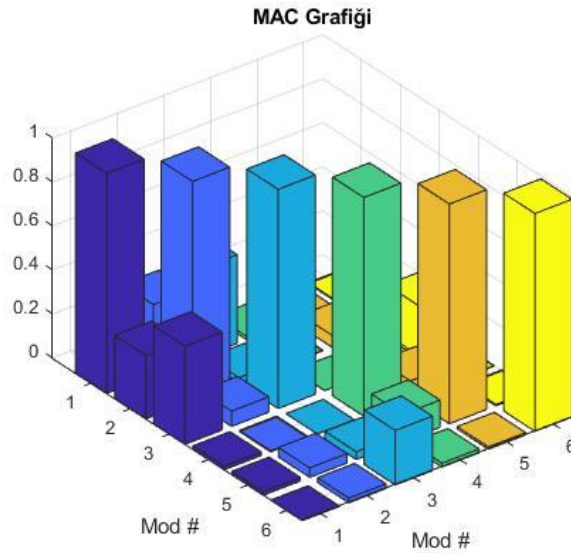
Kiriş-çubuk modelinin asıl amacı ufak değişikliklerle yeni konfigürasyona uygun hale getirilebilmesidir. Karga eniyileme yöntemi ile elde edilen kiriş çubuk modelinin kullanılabilirliğinin test edilmesi amacıyla ODTÜ VLA kanadındaki yakıt kütlesi kaldırılarak yapının tepkisi incelenmiştir. Tablo 12 doğal frekans oranlarını Tablo 13'te ise modal güvence kriterlerini göstermektedir.

	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5	Mod 6
Sonlu Elemanlar Modeli [Hz]	13.455	18.230	19.278	60.601	70.189	100.401
Kiriş-Çubuk Modeli [Hz]	13.488	18.239	19.213	58.245	70.210	102.881
Hata Payı [%]	0.245	0.439	0.337	3.888	0.030	2.470

Tablo 12: Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli- Kiriş Çubuk Modeli Doğal Frekans Karşılaştırması

	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5	Mod 6
MAC	1.000	0.998	0.992	0.994	0.999	0.990

Tablo 13: Mod Şekillerinin Karşılaştırılması



Şekil 13: MAC Grafiği

SONUÇ

Bu çalışmada karga arama algoritması kullanılarak kiriş-çubuk modeli oluşum sürecinden bahsedilmiştir. Oluşturulan kiriş-çubuk modeli doğal frekans ve modal güvence kriterleri göz önünde bulundurularak kıyaslanmıştır. Modal güvence kriterinin yanı sıra, titreşim şekilleri Nastran ortamında görselleştirilmiştir. Karmaşık sonlu elemanlar modeli ve kiriş-çubuk modelinin titreşim şekilleri oldukça benzer çıkmıştır. Her iki modelin doğal frekansları da birbirlerine yakındır. Bu sonuçlarla, genel eniyileme yöntemi kullanarak oluşturulan kiriş-çubuk modelle, AGARD 445.6 kanadının ve ODTÜ VLA kanadının dinamik karakterinin temsil edilebildiği görülmektedir. Kontrol yüzeyi içeren kanat yapıları için kiriş-çubuk modelin oluşturulmasına yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. Ayrıca, oluşturulan kiriş-çubuk modelin kütle değişikliklerinde dahi sonlu elemanlar modeli ile dinamik karakteristiğinin örtüştüğü gözlemlenmiştir.

Kaynaklar

- Askarzadeh, A. (2016). A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm. *Computers & Structures*, 169, 1-12.
- BAŞ, E. (2022). Karga Arama Algoritması için parametre analizleri. *European Journal of Science and Technology*.<https://doi.org/10.31590/ejosat.1039646>
- Cirillo, R., "Detailed and Condensed Finite Element Models for Dynamic Analysis of a Business Jet Aircraft," MSc thesis, The University of Politecnico di Milano, 2011.
- D.J. Ewins, W.G. Walker, *Modal Testing: Theory, Practice and Applications*, Research Studies Press LDT., Baldock, 2001.
- Elsayed, M. S., Sedaghati, R., & Abdo, M. (2009). Accurate stick model development for static analysis of complex aircraft wing-box structures. *AIAA Journal*, 47(9), 2063–2075. <https://doi.org/10.2514/1.38447>
- Guyan, R.J., "Reduction of Stiffness and Mass Matrices," *AIAA Journal*, Vol. 3, No. 2, 1965, p.380.
- Hayirli, U., & Kayran, A. (2017). Stick model development of aircraft structures for dynamic analysis. 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2017-0407>
- Kammer, D. C., "Test-Analysis-Model Development Using an Exact Modal Reduction," *International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, Vol. 2, No. 4, 1987, pp. 174-179.
- MSC Software Corporation, *MSC Nastran 2018 Quick Reference Guide*, 2018.
- O'Callahan, J. C., "A Procedure for an Improved Reduced System (IRS) Model," *Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference*, Union College, Schenectady, NY, 1989, pp. 17-21.
- Smith, A. E., & Coit, D. W. (1995). Penalty functions. *Evolutionary Computation* 2. <https://doi.org/10.1887/0750306653/b840c7>
- Wikimedia Foundation. (2021, Kasım 26). Pareto front. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_front sitesinden 23 Temmuz 2022 tarihinde alınmıştır.
- www.cfd4aircraft.com/models/agard sitesinden 25 Şubat 2022 tarihinde esinlenilmiştir.
- Yates, E. Carson, Jr., "AGARD standard aeroelastic configurations for dynamic response. Candidate configuration I.-wing 445.6", *Technical Memorandum (TM)*,1 Ağustos, 1987