

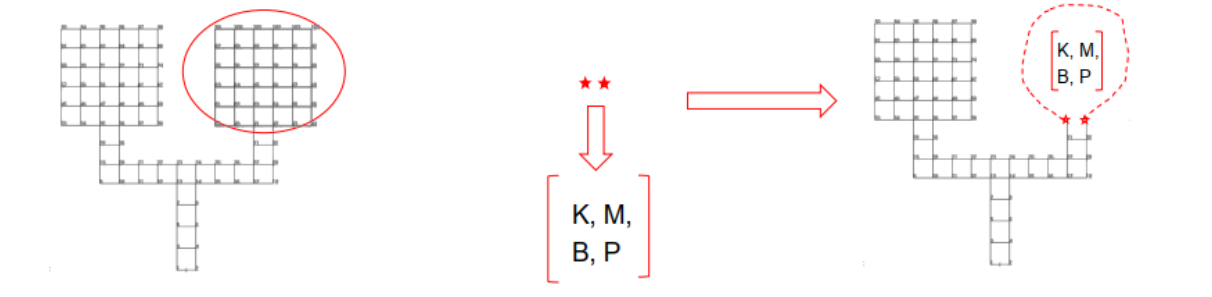
SÜPERELEMANLARA GENEL BİR BAKIŞ

PREPARED/EDITED BY
TOLGA ÇETİN Yapısal Analiz Mühendisi

Date:29.12.2021

1. GİRİŞ

Süperelemanlar sonlu elemanlar modellemesi içerisinde bir matematiksel ve fiziksel gösterim biçimidir (Şekil 1). Sonlu elemanlar ağının bir kısmı belirli tanımlamalar ile Süpereleman olarak tanımlanabilir. Süpereleman tanımlamalarına sınır ve yük koşulları, kütle, malzeme gibi özellikler eklenebilir.



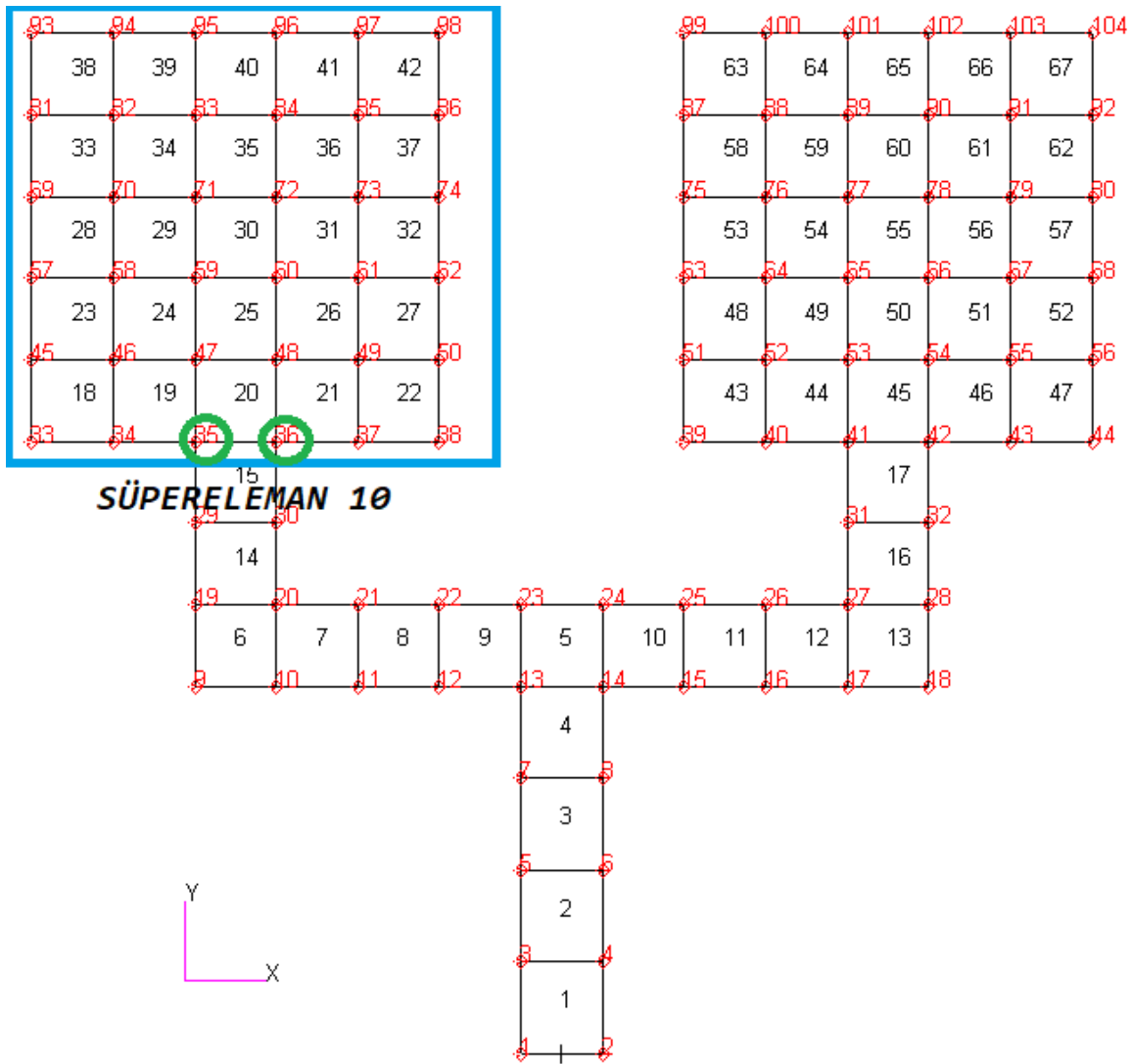
Şekil 1 Süpereleman Matematiksel ve Fiziksel Gösterimi

Süperelemanlar otomotiv, havacılık-uzay ve savunma gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Çözüm verimliliği, parçasal düzeyde hızlı revizyon imkanı, organize çalışma, büyük modelleri basite indirgeme ve gizlilik dolayısıyla tüm modeli koruma gibi konularda süperelemanlar ön plana çıkmaktadır.

Bu yazıda süpereleman metodolojisi, tanımlamaları ve karşılaştırmalı örnek çalışmalar üzerinde durulmuştur.

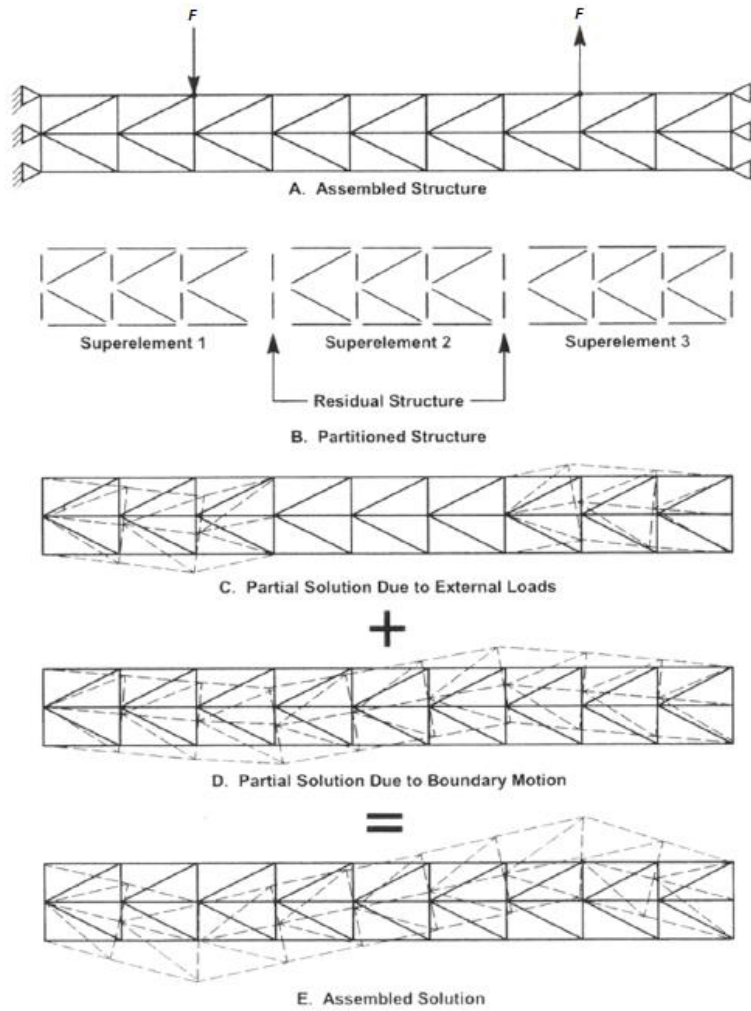
2. SÜPERELEMAN METODOLOJİSİ

Süperelemen sonlu eleman ağının bir parçası olarak tanımlanır. Tanımlanan her süperelemenin kendine ait düğüm noktaları, elemanları, sınır ve yük koşulları vardır. Süperelemenler sonlu eleman ağına “sınır düğüm noktaları”ndan (Exterior Grid Points) bağlanır, Süperelemen içindeki diğer düğüm noktaları ise “iç düğüm noktaları” (Interior Grid Points) olarak tanımlanır (Şekil 2). Her bir düğüm noktasının uzayda altı serbestliği vardır. Sınır düğüm noktalarından Süperelemenlerin fiziksel ve matematiksel aktarımı bu serbestlik ile aktarılmaktadır. Bir düğüm noktası sadece bir süperelemenin İç Düğüm Noktası olabilir.



Şekil 2 Süperelemen Sınır ve İç Düğüm Noktaları

Süpereleman metolojisinde her bir süpereleman birbirlerinden bağımsız olarak çözülür. Bu çözümler esnasında her süperelemanın kendilerine özgü katılık, kütle, kuvvet matrisleri oluşturulur. Her bir süpereleman bir kere çözümlendiğinde diğer süperelemanlara ve/veya ana yapıya etkisi sınır düğüm noktalarından aktarılır. Aktarılan çözümler ana yapı çözümüyle de birleştirilip süperpoze edilir.



Şekil 3 Süpereleman Süperpoze Çözüm

3. SÜPERELEMEN TANIMLAMALARI

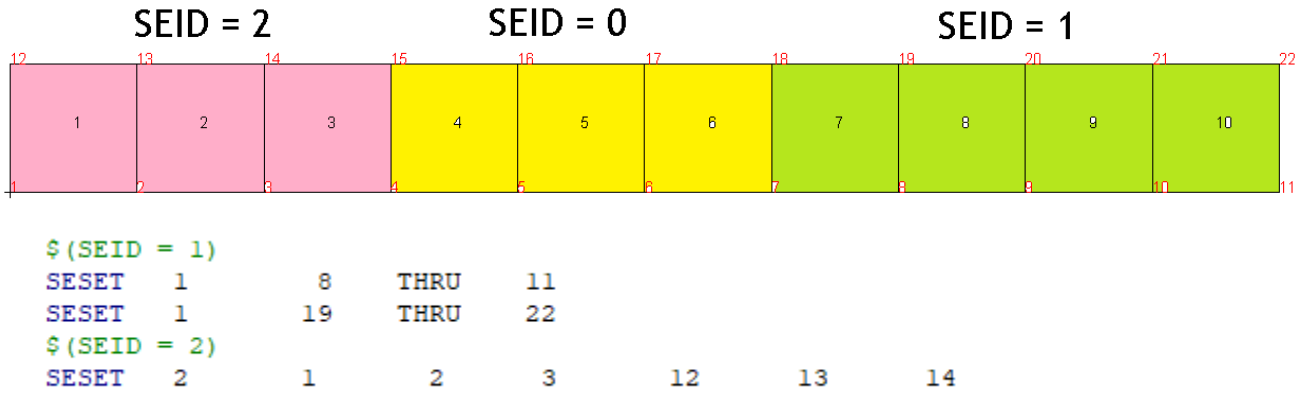
Her bir süpereleman tanımlanırken numaralandırılır. Bu numaralandırmaya Süpereleman ID (SEID) denir. Süpereleman numaralandırması sıfırdan büyük olmalıdır. Süpereleman ID'sı Sıfır (0) olarak tanımlanan yapıya içyapı (Residual Structure) denir. İçyapı, tüm yapıda süpereleman olarak tanımlanmayan kısımdır.

Süpereleman tanımlamaları iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlar İç Süperelemanlar (Internal Superelement) ve Dış Süperelemanlar (External Superelement).

3.1 İÇ SÜPERELEMENLER (INTERNAL SUPERELEMENT)

3.1.1 LIST SUPERELEMENLER

List Süperelemanlar bir iç süpereleman tanımlama çeşididir. MSC NASTRAN girdi dosyası (.bdf)'de Bulk Data kısmında SESET kartlarıyla tanımlanırlar. List Süpereleman tanımlamasında süperelemanların sadece İç Düğüm Noktaları tanımlanır. İç Düğüm Noktalarının komşu düğüm noktaları Sınır Düğüm Noktaları olarak MSC NASTRAN tarafından otomatik olarak algılanır.



Şekil 4 List Süperelemanlar

3.1.2 PART SÜPERELEMANLAR

Part Süperelemanlar bir iç süpereleman tanımlama çeşididir. Part süperelemanlar MSC NASTRAN girdi dosyası (.bdf)'de Bulk Data kısmında ayrı partlar içerisinde tanımlanır. Bu partlar BEGIN SUPER=i komutu ile başlar ve ilgili partın içinde Süperelemanla ait malzeme, yük-sınır koşulları, elemanlar ve düğüm noktaları gibi bütün tanımlamalar bulunur (Şekil 5).

```
SOL 103
...
CEND
...
SUBCASE 1
....
BEGIN BULK

$ MAIN BULK DATA SECTION

BEGIN SUPER = 1
$(SEID = 1)
GRID 8 0. 0. 0.
GRID 9 1. 0. 0.
GRID 10 2. 0. 0.
GRID 11 3. 0. 0.
....
CQUAD4 8 8 9 20 19
.....

BEGIN SUPER = 2
$(SEID = 2)
GRID 1 -7. 0. 0.
GRID 2 -6. 0. 0.
GRID 3 -5. 0. 0.
....
CQUAD4 1 1 2 12 13
.....

ENDDATA
```

Şekil 5 Part Süperelemanlar

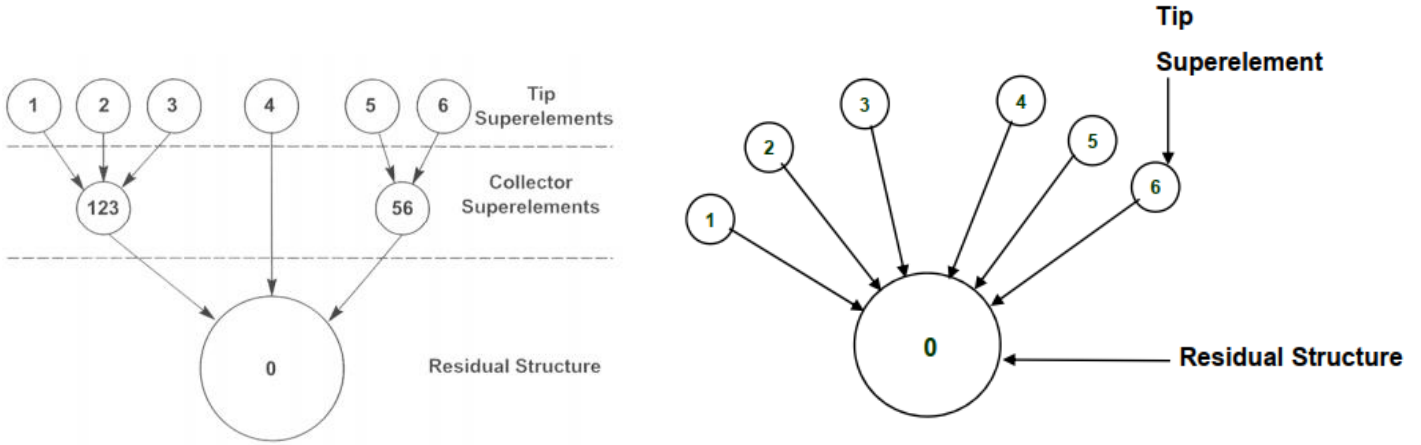
3.2 SÜPERELEMAN SIRALAMALARI

Tanımlanan iç süperelemanların birbiriyle bağlantı, çözüm sıraları da tanımlanabilir. Temel olarak iki tip sıra belirleme çeşidi vardır. Bunlar Tek Level (Single Level) ve Çoklu Level (Multi Level)'dir.

Tek Level tanımlamalarda Süperelemanlar içyapıya ara bir yapı olmadan direkt olarak bağlanırlar. Bağlanan her bir süpereleman Tip Süpereleman olarak adlandırılır (Şekil 6).

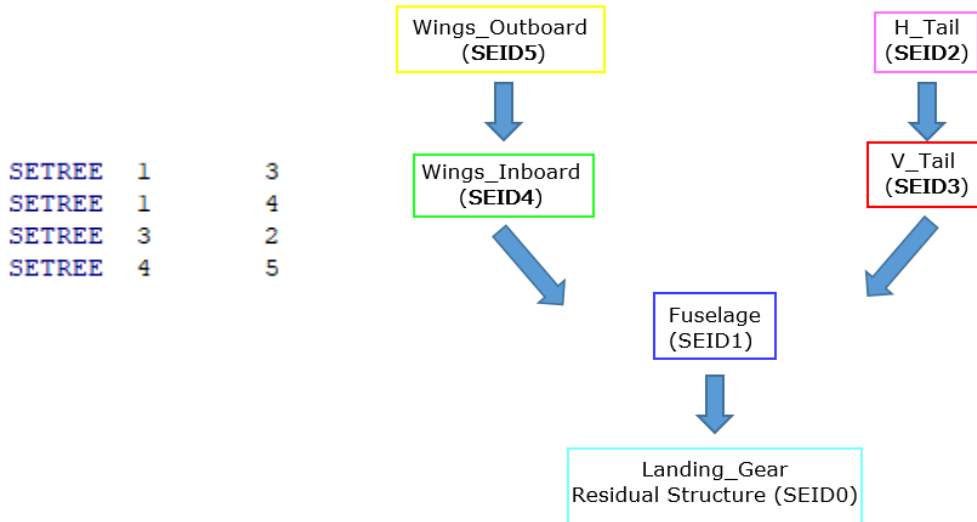
Çoklu Level tanımlamalarında Süperelemanlar (Tip Süperelemanlar) başka süperelemanlara bağlanır ve içyapıya bu toplayıcı süperelemanlar (Collector Süperelemanlar) bağlanır (Şekil 6).

Çoklu Süpereleman tanımlamalarında sıralamada üst kısımda kalan süperelemanlar Upstream, alt tarafta kalanlar ise Downstream olarak adlandırılır.



Şekil 6 Süpereleman Level Tanımlamaları

Bu bağlantı ve çözüm sıralamalarını MSC Nastran' da SETREE kartı ile yapabiliriz (Şekil 7)



Şekil 7 Süpereleman Sıralaması

MSC Nastran Süpereleman modeli çözümlerinde çıktı dosyasında bu sıralamayı ve tanımlamaları gösteren bir bölge oluşturur bu bölgeye SEMAP adı verilir (Şekil 8-9). SEMAP içerisinde kullanılan süperelemanların bağlantılarını, işlem sıralarını, iç ve sınır düğüm noktaları gibi birçok bilgiyi içerir.

```

0
0 SUPERELEMENT DEFINITION TABLE (SORTED BY SEID)
0
SUPERELEMENT   PRIMARY   PROCESS   DOWNSTREAM
SUPERELEMENT   SUPERELEMENT   ORDER   SUPERELEMENT           TYPE           LABEL
-----
0 0 6 0 RESIDUAL STRUCTURE
1 0 5 0 PRIMARY (BEGIN SUPER)
2 0 1 3 PRIMARY (BEGIN SUPER)
3 0 3 1 PRIMARY (BEGIN SUPER)
4 0 4 1 PRIMARY (BEGIN SUPER)
5 0 2 4 PRIMARY (BEGIN SUPER)

0
0 SUPERELEMENT DEFINITION TABLE (SORTED BY PROCESS ORDER)
0
SUPERELEMENT   PRIMARY   PROCESS   DOWNSTREAM
SUPERELEMENT   SUPERELEMENT   ORDER   SUPERELEMENT           TYPE           LABEL
-----
2 0 1 3 PRIMARY (BEGIN SUPER)
5 0 2 4 PRIMARY (BEGIN SUPER)
3 0 3 1 PRIMARY (BEGIN SUPER)
4 0 4 1 PRIMARY (BEGIN SUPER)
1 0 5 0 PRIMARY (BEGIN SUPER)
0 0 6 0 RESIDUAL STRUCTURE

0
0 TABLE OF DOWNSTREAM SUPERELEMENTS FOR EACH SUPERELEMENT
0 SUPERELEMENT   DOWNSTREAM SUPERELEMENTS IN DOWNSTREAM ORDER
-----
1 0
2 3 1 0
3 1 0
4 1 0
5 4 1 0

1 THIS IS A DEFAULT SUBCASE.
SEPTEMBER 2, 2021 MSC Nastran 12/ 9/20 PAGE 7

```

Şekil 8 SEMAP – Süpereleman Bağlantı ve İşlem Sıralaması

```

0
TYPE = RESIDUAL STRUCTURE
SUPERELEMENT 0
LIST OF INTERIOR POINTS ( TOTAL NO. OF INTERIOR POINT = 3 )
INDEX -1- -2- -3- -4- -5- -6- -7- -8- -9- -10-
1 26B 27B 28B

0
TYPE = RESIDUAL STRUCTURE
SUPERELEMENT 0
LIST OF ELEMENTS ( TOTAL NO. OF ELEMENTS = 3 )
INDEX -1- -2- -3- -4- -5- -6- -7- -8- -9- -10-
1 398 399 400

0
TYPE = PRIMARY (BEGIN SUPER)
SUPERELEMENT 1
LIST OF EXTERIOR POINTS ( TOTAL NO. OF EXTERIOR POINT = 3 )
INDEX -1- -2- -3- -4- -5- -6- -7- -8- -9- -10-
1 26B 27B 28B

0
TYPE = PRIMARY (BEGIN SUPER)
SUPERELEMENT 1
LIST OF INTERIOR POINTS ( TOTAL NO. OF INTERIOR POINT = 15 )
INDEX -1- -2- -3- -4- -5- -6- -7- -8- -9- -10-
1 11B 12B 13B 14B 15B 16B 17B 18B 19B 20B
11 21B 22B 23B 24B 25B

```

Şekil 9 SEMAP – Süpereleman İç ve Sınır Düğüm Noktaları

3.3 DIŞ SÜPERELEMANLAR (EXTERNAL SUPERELEMENT)

Dış Süperelemanlar dışarıdan daha önceden tanımlanan ve modele sonradan eklenebilen süperelemanlardır. Dış süpereleman tanımlaması için yaygın olarak PARAM, EXTSEOUT komutu kullanılır. Oluşturulan Dış Süperelemanların matematiksel matrisleri .MASTER, .DBALL, .op2, .op4 gibi MSC NASTRAN çıktıları kullanılabilir.

Dış Süperelemanlar, iç süperelemanlardan daha yaygın kullanıma sahiptir. Bunun başlıca nedenleri olarak tekrarlanan modelleri bir kere modelleyip ana modele ekleme kolaylığı, gizlilik dolayısıyla tüm modeli paylaşamama ve karışık modelleri daha basite indirgeyerek ilgilenilecek bölgeye daha rahat odaklanma gösterilebilir.

Bu yazıda örnek çalışmalarda Dış Süperelemanlar kullanılmıştır.

```

$ Ext.SE data
$-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8-----9-----0-----
ASSIGN INPUT4='extse1.op4' unit=36
ASSIGN INPUT4='extse2.op4' unit=37
ASSIGN INPUT4='extse3.op4' unit=38
ASSIGN INPUT4='extse4.op4' unit=39
ASSIGN INPUT4='extse5.op4' unit=40
SOL 103
CEND
SUBCASE 1
  SUBTITLE=Jet_Modes
  METHOD = 1
  SPC = 2
  VECTOR (SORT1,REAL)=ALL
  SPCFORCES (SORT1,REAL)=ALL
BEGIN BULK
...
EIGRL 1 10 0 MASS
$RESIDUAL STRUCTURE
PBARL 2 1 TUBE
  .8 .5 0.
CBAR 398 2 43 458 1. 0. 0.
...
MAT1* 1 1.65+7 6.34615+6 .3
* .16
$ Nodes of the Entire Model
GRID 43 12.375 .707107 -.707098
GRID 45 7.50003 2.87-7 -.999998
...
SPCADD 2 1
SPC1 1 123456 457 458 459
$ Ext.SE data
$-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8-----9-----0-----
INCLUDE 'se1_fuselage_modes.asm'
INCLUDE 'se2_h_tail_modes.asm'
INCLUDE 'se3_v_tail_modes.asm'
INCLUDE 'se4_wings_inboard_modes.asm'
INCLUDE 'se5_wings_outboard_modes.asm'
$ Ext.SE data
INCLUDE 'se1_fuselage_modes.pch'
INCLUDE 'se2_h_tail_modes.pch'
INCLUDE 'se3_v_tail_modes.pch'
INCLUDE 'se4_wings_inboard_modes.pch'
INCLUDE 'se5_wings_outboard_modes.pch'
$-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8-----9-----0-----
ENDDATA

```

```

ASSIGN OUTPUT4='extse1.op4',UNIT=36
SOL 103
CEND
ECHO = NONE
EXTSEOUT (STIF,MASS,ASMBULK,EXTBULK,EXTID=1,MAIOP4=36)
SUBCASE 1
  SUBTITLE=Jet_Modes
  METHOD = 1
  VECTOR (SORT1,REAL)=ALL
  SPCFORCES (SORT1,REAL)=ALL
BEGIN BULK
...
EIGRL 1 20 0 MASS
PSHELL 1 1 .376 1 1
...
CQUAD4 17 1 5 9 31 30 0. 0.
...
MAT1* 1 1.65+7 6.34615+6 .3
* .16
$ Nodes of the Entire Model
GRID* 5 7.50003 -6.12325-17
* 1.
...
ASET1 123456 24 35 36 37 38 39 43
45 53 55 56 57 58 59 106
115 124 133
ENDDATA

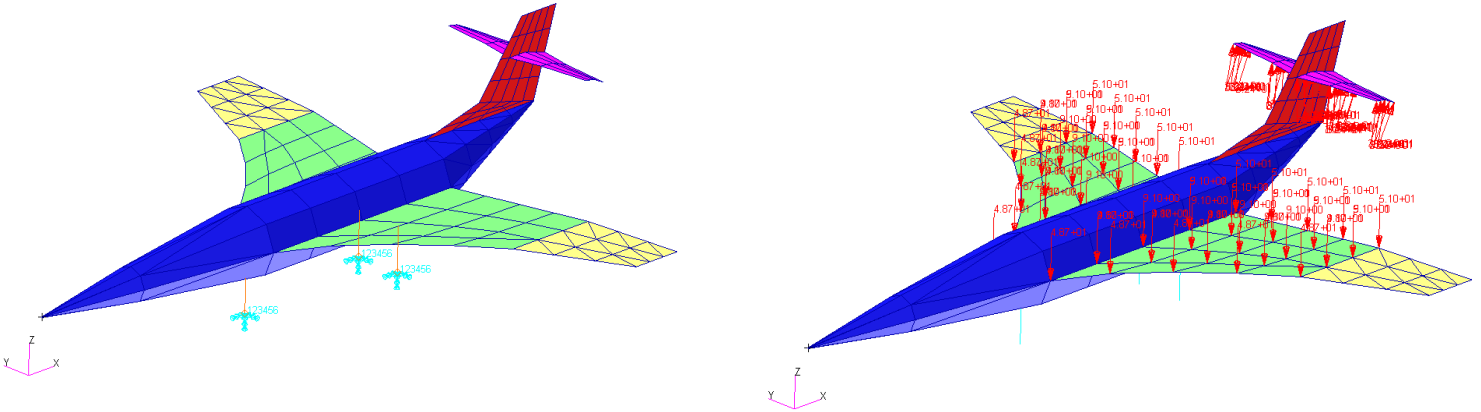
```

Şekil 10 Dış Süperelemanlar

4. ÖRNEK SÜPERELEMAN ÇALIŞMALARI

4.1. MODEL TANIMLARI

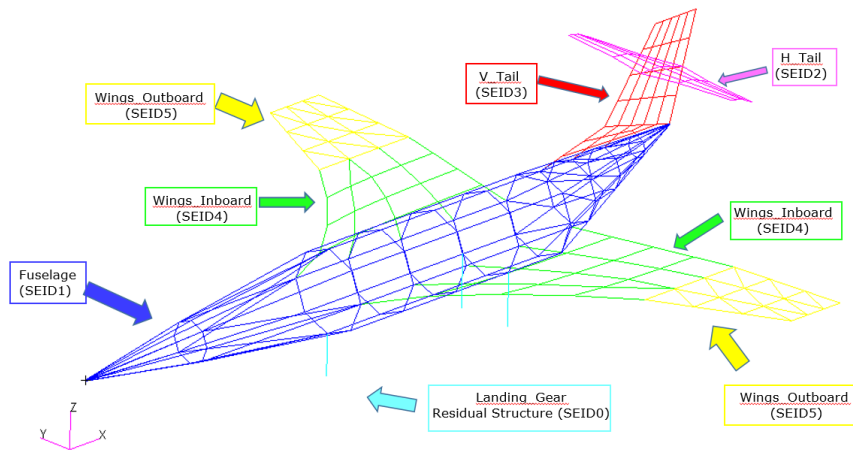
2B ve 1B elemanlardan oluşan bir uçak modeli, Fuselage yapısının altında bulunan 1B elemanların ucundan global eksenle öteleme ve dönem yönlerinde sınırlandırılmış olup, Tail ve Wings yapısı üzerinden basınç ile bir yükleme senaryosu oluşturulmuştur (Şekil 11).



Şekil 11 Sonlu Eleman Modeli Yükleme ve Sınır Koşulları

Kullanılan modelde 5 adet Dış Süper eleman ve 1 adet iç yapı tanımlaması yapılmıştır. Oluşturulan 5 Dış Süper eleman iç yapıyla birleştirip tüm yapı süper eleman metodolojisiyle çözdürülmüştür (Şekil 12).

Karşılaştırma için tüm yapı Süper eleman yapılmadan da çözdürülüp sonuçlar incelenmiştir.



Şekil 12 Oluşturulan Süper elemanlar

4.2. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Oluşturulan model hem Dış Süperelemanlar kullanılarak hem de süpereleman tanımlaması yapılmadan bir bütün olarak çözdürülmüştür. Model ile Statik ve Modal çözüm yapılmıştır. Her iki çözüm için de MSC Nastran 2021 kullanılmış olup, sonuçlar Patran 2021 üzerinden incelenip, aşağıdaki tabloda derlenmiştir.

Tablo 1 Karşılaştırmalı Statik Analiz Sonuçları Özeti

Statik Analiz Sonuç Özet Tablosu				
Parametre	Birim	Süpereleman Modellemesi	Standart Modelleme	Yüzdesele Fark
Maks. Deformasyon	in	0.3	0.3	0.00%
Maks. VonMises Gerilmesi	psi	8080.44	8080.44	0.00%

Tablo 2 Karşılaştırmalı Modal Analiz Sonuçları Özeti

Modal Analiz Sonuç Özet Tablosu				
Mode #	Birim	Süperleman Modellemesi	Standart Modelleme	Yüzdesele Fark (%)
1	Hz	273.96	273.96	0.00%
2	Hz	296.16	296.16	0.00%
3	Hz	626.41	626.41	0.00%
4	Hz	978.02	977.91	0.01%
5	Hz	1053.97	1053.98	0.00%
6	Hz	1155.88	1155.88	0.00%
7	Hz	1287.39	1286.95	0.03%
8	Hz	1448.41	1448.40	0.00%
9	Hz	1545.23	1545.41	-0.01%
10	Hz	1575.11	1575.09	0.00%

MODE NO.	EXTRACTION ORDER	EIGENVALUE	REAL EIGENVALUES		GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS
			RADIANS	CYCLES		
1	1	2.962988E+06	1.721333E+03	2.739587E+02	1.000000E+00	2.962988E+06
2	2	3.462745E+06	1.860845E+03	2.961627E+02	1.000000E+00	3.462745E+06
3	3	1.549104E+07	3.935866E+03	6.264125E+02	1.000000E+00	1.549104E+07
4	4	3.775374E+07	6.144407E+03	9.779128E+02	1.000000E+00	3.775374E+07
5	5	4.385566E+07	6.622361E+03	1.053981E+03	1.000000E+00	4.385566E+07
6	6	5.274508E+07	7.262581E+03	1.155876E+03	1.000000E+00	5.274508E+07
7	7	6.538589E+07	8.086154E+03	1.286951E+03	1.000000E+00	6.538589E+07
8	8	8.282058E+07	9.100581E+03	1.448403E+03	1.000000E+00	8.282058E+07
9	9	9.428565E+07	9.710080E+03	1.545407E+03	1.000000E+00	9.428565E+07
10	10	9.794223E+07	9.896576E+03	1.575089E+03	1.000000E+00	9.794223E+07

SEPTEMBER 2, 2021 MSC Nastran 12/18/18 PAGE 14

Şekil 13 Süperleman Kullanılmayan Modal Çözüm

MODE NO.	EXTRACTION ORDER	EIGENVALUE	REAL EIGENVALUES		GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS
			RADIANS	CYCLES		
1	1	2.962988E+06	1.721333E+03	2.739587E+02	1.000000E+00	2.962988E+06
2	2	3.462745E+06	1.860845E+03	2.961627E+02	1.000000E+00	3.462745E+06
3	3	1.549075E+07	3.935830E+03	6.264067E+02	1.000000E+00	1.549075E+07
4	4	3.776221E+07	6.145096E+03	9.780224E+02	1.000000E+00	3.776221E+07
5	5	4.385494E+07	6.622306E+03	1.053973E+03	1.000000E+00	4.385494E+07
6	6	5.274502E+07	7.262577E+03	1.155875E+03	1.000000E+00	5.274502E+07
7	7	6.543066E+07	8.088922E+03	1.287392E+03	1.000000E+00	6.543066E+07
8	8	8.282177E+07	9.100647E+03	1.448413E+03	1.000000E+00	8.282177E+07
9	9	9.426448E+07	9.708990E+03	1.545234E+03	1.000000E+00	9.426448E+07
10	10	9.794447E+07	9.896690E+03	1.575107E+03	1.000000E+00	9.794447E+07

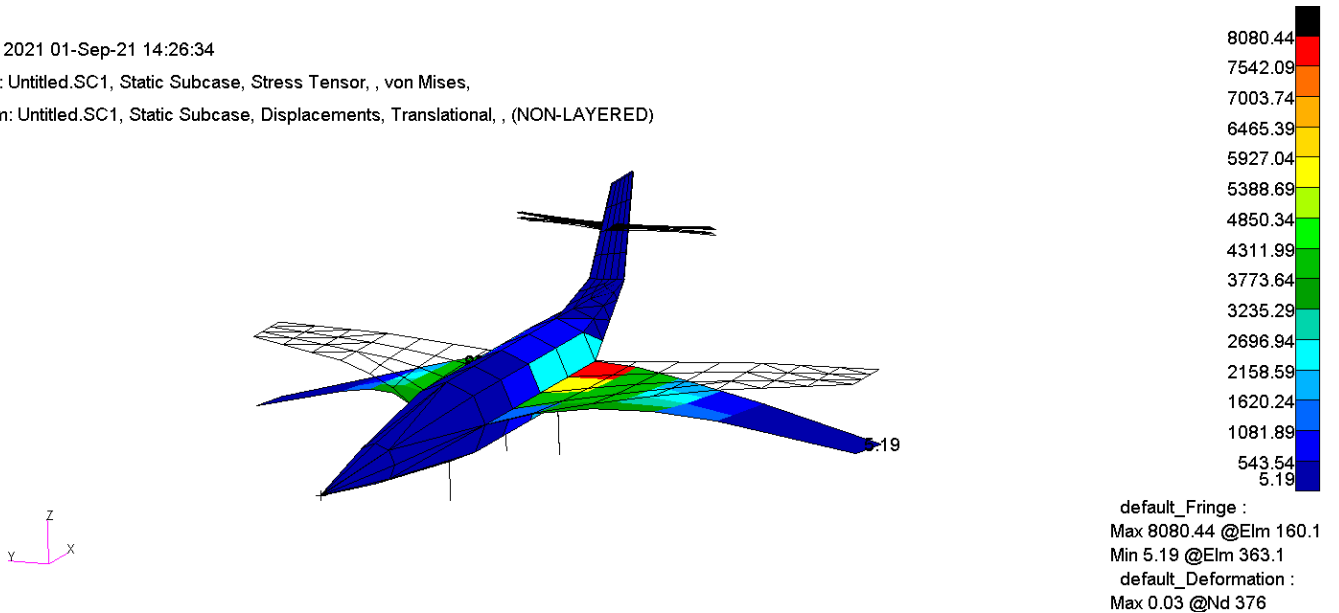
SEPTEMBER 2, 2021 MSC Nastran 12/18/18 PAGE 31
SUPERELEMENT 0

Şekil 14 Dış Süperleman Kullanılan Modal Çözüm

Patran 2021 01-Sep-21 14:26:34

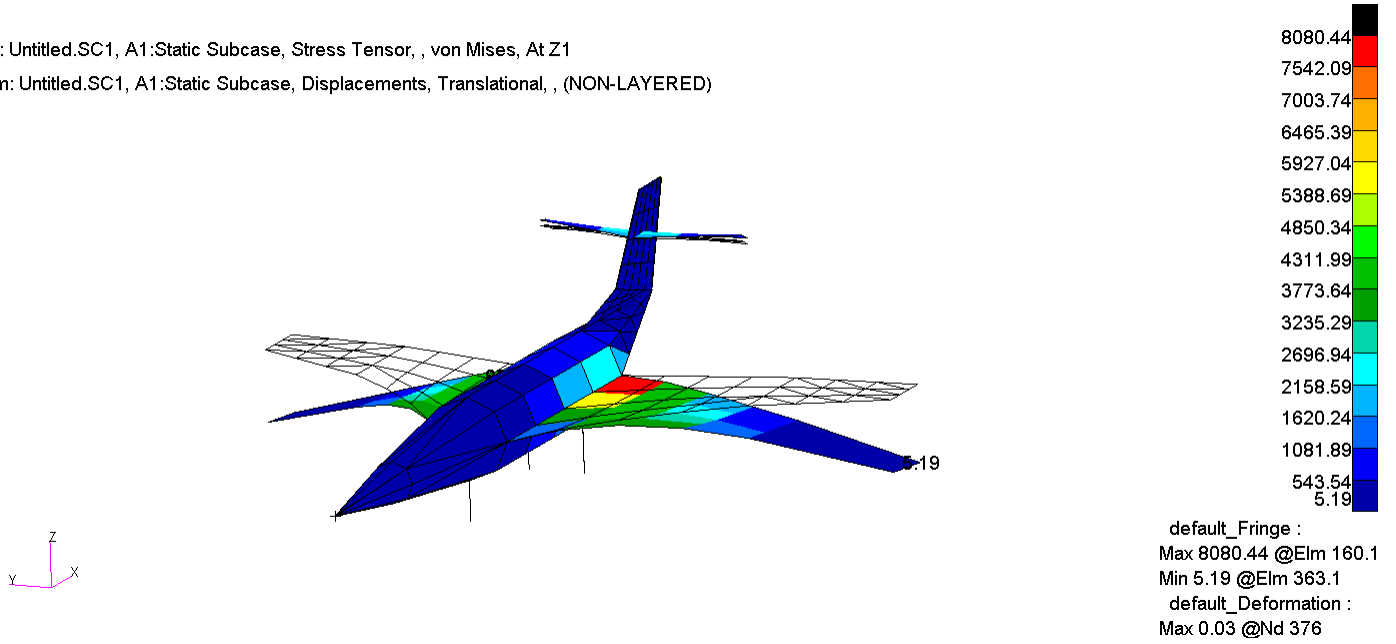
Fringe: Untitled.SC1, Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises,

Deform: Untitled.SC1, Static Subcase, Displacements, Translational, , (NON-LAYERED)



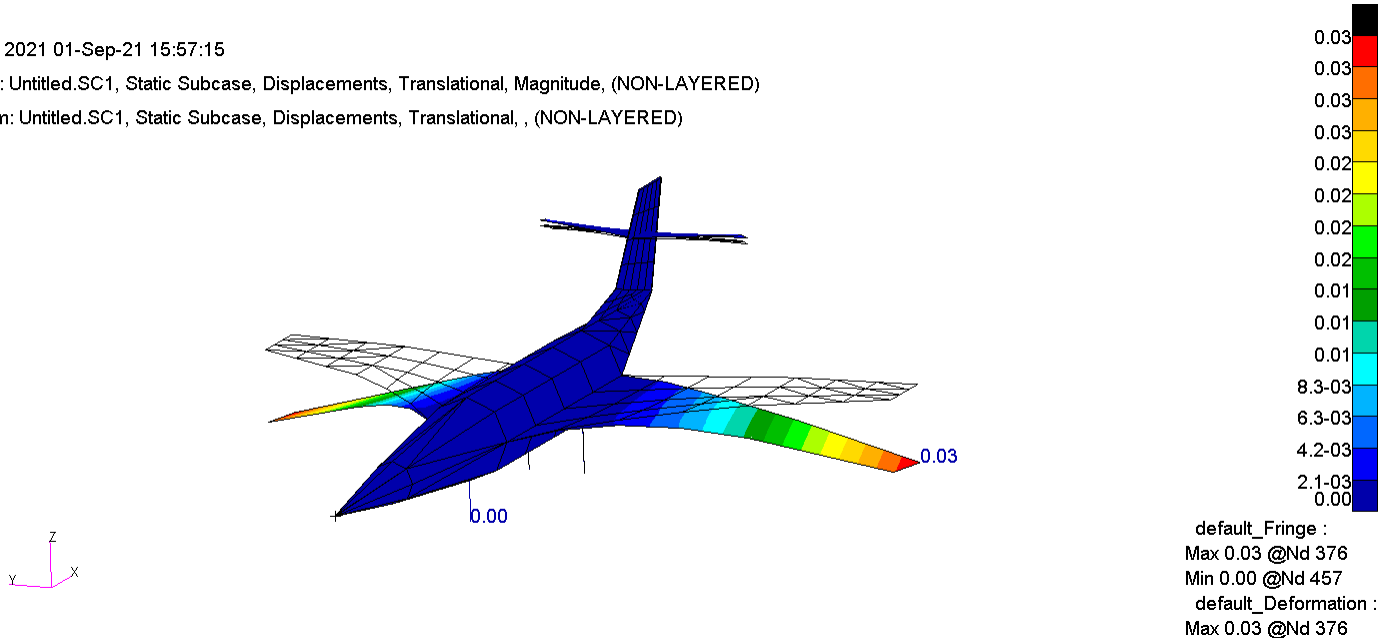
Şekil 15 Dış Süperleman Kullanılan Statik Çözüm – Gerilme Sonuçları

Fringe: Untitled.SC1, A1:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, At Z1
 Deform: Untitled.SC1, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, , (NON-LAYERED)



Şekil 16 Süperleman Kullanılmayan Statik Çözüm - Gerilme Sonuçları

Patran 2021 01-Sep-21 15:57:15
 Fringe: Untitled.SC1, Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)
 Deform: Untitled.SC1, Static Subcase, Displacements, Translational, , (NON-LAYERED)

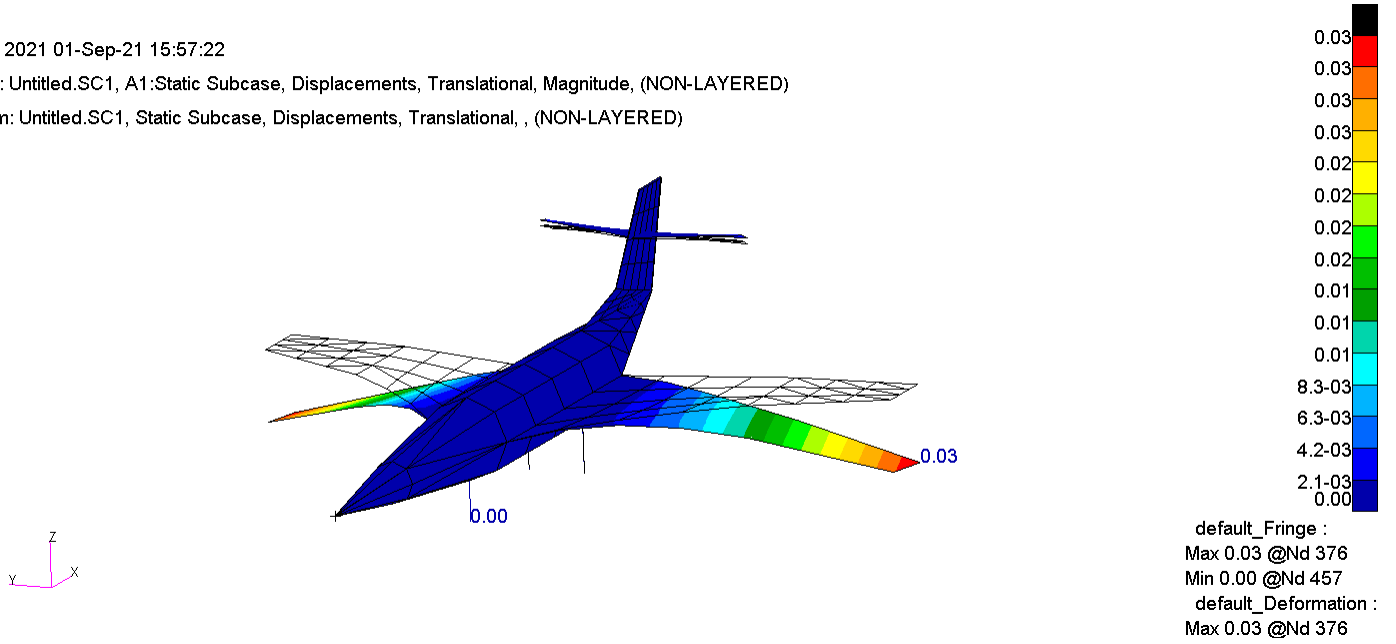


Şekil 17 Dış Süperleman Kullanılan Statik Çözüm – Deformasyon Sonuçları

Patran 2021 01-Sep-21 15:57:22

Fringe: Untitled.SC1, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: Untitled.SC1, Static Subcase, Displacements, Translational, , (NON-LAYERED)



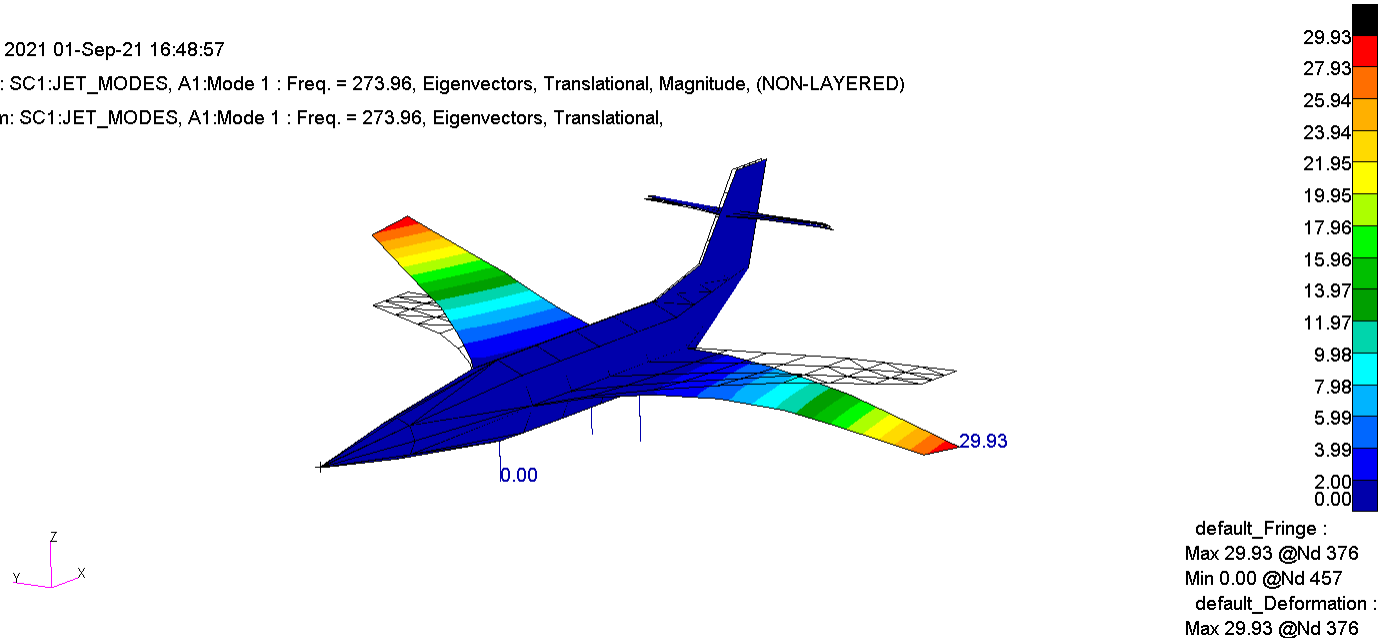
Şekil 18 Süperleman Kullanılmayan Statik Çözüm – Deformasyon Sonuçları

Sonuçlar incelenirken gerilme sonuçları için averajlanmamış eleman çıktıları kullanılmıştır. Görsellerden de gözlemlendiği üzere süperleman metodolojisi ve standart çözüm için sonuçların ve genel dağılımların aynı olduğu gözlemlenmiştir.

Patran 2021 01-Sep-21 16:48:57

Fringe: SC1:JET_MODES, A1:Mode 1 : Freq. = 273.96, Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC1:JET_MODES, A1:Mode 1 : Freq. = 273.96, Eigenvectors, Translational,

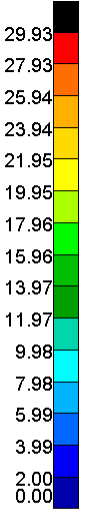
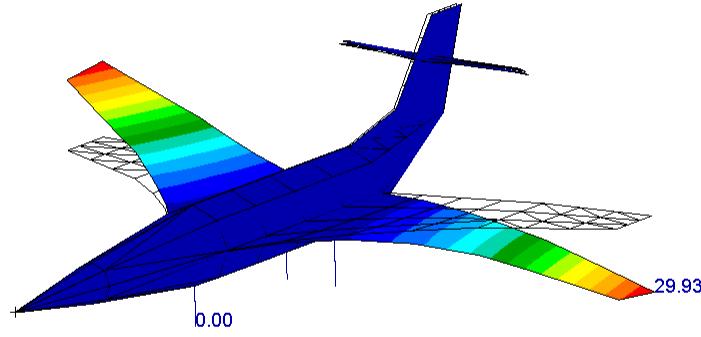


Şekil 19 Dış Süperleman Kullanılan Modal Çözüm – Freq.1

Patran 2021 01-Sep-21 16:48:24

Fringe: Untitled.SC1, Mode 1:Freq.=273.96, Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: Untitled.SC1, Mode 1:Freq.=273.96, Eigenvectors, Translational,



default_Fringe :
Max 29.93 @Nd 376
Min 0.00 @Nd 457
default_Deformation :
Max 29.93 @Nd 376

Şekil 20 Süpereleman Kullanılmayan Modal Çözüm – Freq.1

Sonuçlar incelenirken ilk 10 Mod incelenmiştir. İki metotta da sınır koşulu uygulanmış modal analiz yapılmış olup, iki metot sonucunda da hesaplanan doğal frekans değerlerinin aynı olduğu gözlenmiştir.