

MSC Nastran ile Kütle Katılım Çıktısı ve İncelemeleri

HAZIRLAYAN
Elif Hilal Kılıç Kd. Yapısal Analiz Müh.

Tarih: 17/11/2022

1. GİRİŞ

Modal etkin kütle katılımı(kütle katılım), bir modun, yapının dinamik davranışının etkisinin katılımını tanımlar. Dinamik anlamda % 'lik katılım etkisidir. Bir dinamik çözümdeki doğruluk, kütleden büyük ölçüde etkilenir. Analiz edilen yapının modal özellikleri hakkında bilgi edinilmesine yardımcı olabilir. Örneğin bir modda kütlelerin hareket ettiği yönünü belirleyerek veya her modun toplam kütleyle ne kadar kütle katkıda bulunduğunu belirleyerek modal özellikleri hakkında bilgi edinilmesini sağlar.

2. MODAL ETKİN KÜTLE KATILIM ÇIKTISI (MEFFMASS)

Bir dinamik çözümün kalitesinin çoğu, kütlelerin doğruluğuna bağlı olduğundan modların her birine kütlelerin nasıl katıldığına anlaşılması, bir moddaki kütlelerin hareket ettiği yönü ve her modun toplamda ne kadar kütle katkıda bulunduğuna anlaşılması da önemlidir.

Bir yapının kütlesi, analiz edilen yapının özellikleri hakkında çok fazla fikir verebilir. Bir yapının tepkisinde hangi modların baskın bir rol oynayacağı transient veya frekans-cevap gibi bir tür yükleme uygulanana kadar, tahmin etmek çok zordur.

Ne olacağını tahmin etmeye yardımcı olacak bir yöntemde önemli olan modlar, modsal katılım faktörlerini hesaplamaktır. Herhangi bir vektörü tanımlamak için özvektörlerin(eigenvector) lineer kombinasyonları kullanılabilir. Bunun nedeni, normal mod analizinde hesaplanan özvektörler, birbirinden lineer olarak bağımsızdır ve model yanıtını tanımlamak için kullanılan vektör uzayını kapsar. Bir katı(rijit) cisim vektörü, istenen yönde harekete sahip olan bir dizi esnek cisim özvektöründen oluşturulabilir.

Katı(rijit) cisim dönüşüm matrisi $\{D\}_R$ ve modal etkin kütle matrisi M_R , özvektör veya mod şekli (eigenvector) $[\varphi]$, modal katılım faktörü (modal participation factor) α , genelleştirilmiş kütle matrisi m ,

Modal etkin kütle matrisi denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$M_R = \{D\}_R^T [M] \{D\}_R$$

$$\{D\}_R = [\varphi] \{\varepsilon\}$$

$$M_R = \{\varepsilon\}^T [\varphi]^T [M] [\varphi] \{\varepsilon\} = \{\varepsilon\}^T [m] \{\varepsilon\}$$

3. MEFFMASS KOMUTUNUN PATRAN VE MSC NASTRAN 'DA İNCELENMESİ VE İŞ AKIŞI

Modal etkin kütlelerin hesaplanan değerleri farklı endüstriler tarafından farklı şekillerde kullanılmaktadır. Örneğin, İnşaat Mühendisliği sismik analizinde, her modun katkısı yüzde olarak değerlendirilir ve toplam toplanır. % 100 'den herhangi bir eksiklik "eksik kütle" olarak sınıflandırılır. Eksik kütle önemliyse, o zaman analizdeki hataları gösterebilir, tipik olarak modal bir yöntemde yetersiz modlar kullanılır. Eksik kütle genellikle daha yüksek frekanslı gövde tipi yükleme olarak karakterize edilir ve uygun yönde 1g atalet yükü uygulanarak simüle edilebilir, eksik kütle yüzdesi ile çarpanlara ayrılır ve ardından statik yük olarak eklenir. Testlerde birçok kez modal etkin kütle, yeterli modların korunup korunmadığını ölçmenin bir yolu olarak kullanılır.

Modal etkin kütle durum kontrol komutu bu bilgiyi MSC Nastran ile bdf 'te output çıktısı tanımlayarak sağlayabilir.

$$\text{MEFFMASS} \left[\begin{array}{c} \text{PRINT} \\ \text{NOPRINT} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \text{PUNCH} \\ \text{NOPUNCH} \end{array} \right], \text{GRID} = \text{gid}, \left[\begin{array}{c} \text{SUMMARY, PARTFAC,} \\ \text{MEFFM, MEFFW,} \\ \text{FRACSUM, ALL} \end{array} \right] = \left\{ \begin{array}{c} \text{YES} \\ \text{NO} \end{array} \right\}$$

BDF içerisindeki formatı yukarıdaki gibidir. Açıklamaları aşağıdaki gibidir.

Tablo 3-1: MEFFMASS komutunun format içerisindeki özellikleri

TERİM	AÇIKLAMA
PRINT	Çıktıyı yazdırma dosyasına yazdır (varsayılan).
NOPRINT	Çıktıyı yazdırma dosyasına yazdırmaz.
PUNCH	Punch dosyasına çıktı yazdır.
NOPUNCH	Punch dosyasına çıktı yazmayın (varsayılan).
gid	Katı cisim kütle matrisinin hesaplanması için bir GRID noktasına başvurun. Varsayılan, temel koordinat sisteminin kökenidir.
SUMMARY	Toplam etkin kütle oranı, modal etkin kütle matrisi ve katı cisim kütle matrisinin hesaplanmasını ister (varsayılan).
PARTFAC	Modal katılım faktörlerinin hesaplanmasını talep eder.
MEFFM	Kütle birimlerinde modal etkin kütlelerin hesaplanmasını ister.
MEFFW	Ağırlık birimlerinde modal etkin kütlelerin hesaplanmasını ister.
FRACSUM	Modal etkin kütle katılım oranlarının hesaplanmasını ister.

Örneğin:

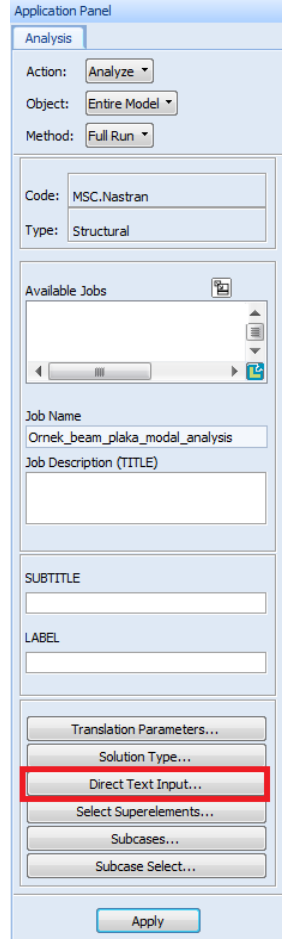
```
MEFFMASS
MEFFMASS (GRID=12, SUMMARY, PARTFAC)
```

- MSC Nastran 'da "SUMMARY" terimi 3 çıktı üretir.
 1. Modal etkin kütle matrisi $[\varepsilon^T][m][\varepsilon]$
 - ε = modal katılım faktörü $[m^{-1}][\varphi^T][M_{aa}][D_{ar}]$
 - m = genelleştirilmiş kütle matrisi
 - φ = özvektör
 - M_{aa} = Kütle matrisini a-setine indirgenmesi
 - D_{ar} = A-setine göre katı cisim dönüşüm matrisi
 2. A-set katı cisim kütle matrisi $[D_{ar}^T][M_{aa}][D_{ar}]$
 3. Toplam etkin kütle katılım oranı: modal etkin kütle matrisinin köşegen elemanları, katı cisim kütle matrisi tarafından bölünmesi
- PARTFAC tanımlayıcısı, modal katılım faktörleri tablosunun çıktısını verir.
- MEFFM tanımlayıcısı, modal etkin kütle tablosu ε^2 , modal katılım faktörleri tablosunu terimsel açıdan karesini verir.
- MEFFW tanımlayıcısı, modal etkin ağırlık tablosunun çıktısını verir. Yani modal etkin kütle PARAM, WTMASS tarafından bölünmüş olur.
- FRACSUM tanımlayıcısı, modal etkin kütle katılım tablosunun çıktısını verir. Yani genelleştirilmiş kütle matrisi (köşegen terim) çarpı modal etkin kütle bölü katı cisim kütle matrisi (köşegen terim).

4. PATRAN İLE MODAL ETKİN KÜTLE KATILIMI ÇIKTISI (MEFFMASS)

Patran 'da "MEFFMASS" durum control komutu için bir tanımlama butonu bulunmamaktadır. Bundan dolayı Analysis bölümünde "Direct Text Input" içerisinde tanımlanabilmektedir. Patran ve MSC Nastran 'da MEFFMASS tanımı, normal modes analysis (SOL103), direct frequency response (SOL108), modal frequency response analysis (SOL111) ve transient response (SOL112) analiz modülleri içerisinde kullanılmaktadır.

Aşağıdaki bahsedilen örnek beam modelinde modal etkin kütle katılım çıktısı tanımlamasının Patran 'da nasıl tanımlandığını ve sonuçlarını inceleyelim. Patran içerisinde MSC Nastran komutlarının çoğu buton olarak bulunmamaktadır. Bu yüzden bazı MSC Nastran komutları Patran içerisinde tanımlamak için modelin analiz sayfasında "Analysis" bölümünde "Direct Text Input" komutu kullanılarak tanımlanır.



Şekil 4-1: Direct Test Input penceresi

Modal etkin kütlelerin tüm node 'lar dahilinde hesaplanması için,

Direct Text Input...

tıklanır. Açılan pencereden,

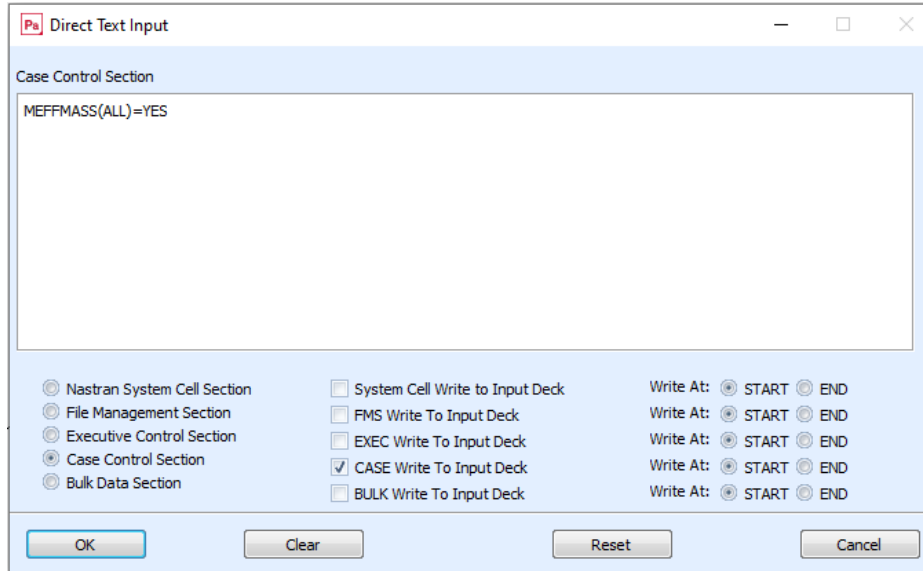
Case Control Section

Case write to input deck

seçenekleri işaretlenir. "Case Control Section" alanına,

MEFFMASS(ALL)=YES

yazılıp pencere onaylanır.

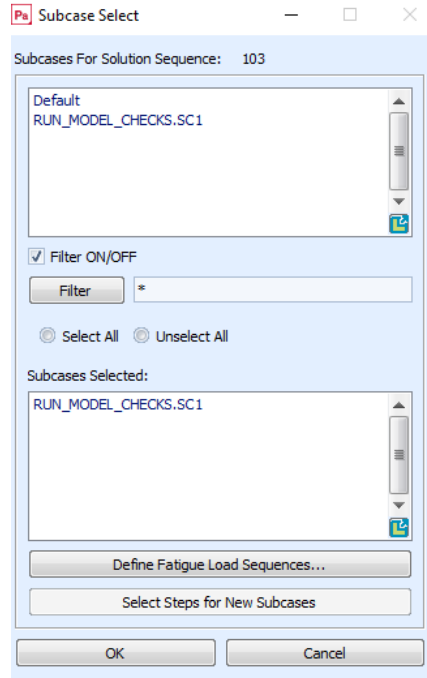


Şekil 4-2: Direct Test Input penceresi

Analizi yapılacak subcase seçimleri için,

Subcase Select...

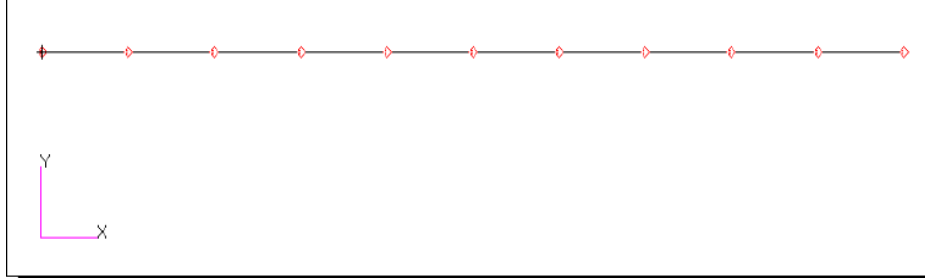
Tıklanır. Analize dahil edilmesi istenen subcase 'ler aşağıdaki görselde görüldüğü gibi seçilir. "Subcase selected" alanında seçilen subcase isimleri görünmektedir. Pencere onaylanır.



Şekil 4-3: Subcase seçimi

Yapılan düzenlemeler sonrası modelin modal analizi yapılması için "Method:Full Run" seçimi yapılarak "Apply" butonuna tıklanır.

Çalışma klasöründe oluşan f06 dosyasında bulunan 10 moddaki output çıktılarına bakalım.



Şekil 4-4: Örnek beam model

Etkin kütle matrisi, modlar tarafından temsil edilen 6x6 kütleler, A-SET katı cisim kütle matrisi ise yapının gerçek 6x6 katı cisim kütleleridir (rigid body mass). Toplam etkin kütle katılım çıktısı, modlar tarafından toplam olası katı cisim kütlelerinin ne kadarının temsil edildiğini gösterir.

```

TOTAL EFFECTIVE MASS FRACTION
REFERENCE POINT AT ORIGIN OF BASIC COORDINATE SYSTEM

      T1          T2          T3          R1          R2          R3
9.658039E-18    9.106091E-01    9.657330E-01    9.544342E-01    9.996986E-01    9.985170E-01

EFFECTIVE MASS MATRIX
***
*  4.141657E-22  3.485905E-14  2.779615E-16  8.022991E-17 -1.545863E-16  4.482226E-14 *
*  3.485905E-14  3.904965E-05 -3.352708E-12 -2.738033E-11  2.219285E-12  2.228940E-04 *
*  2.779615E-16 -3.352708E-12  4.141353E-05  1.762739E-06 -2.248915E-04 -2.502440E-12 *
*  8.022991E-17 -2.738033E-11  1.762739E-06  3.104392E-07 -9.389909E-06 -1.484758E-10 *
* -1.545863E-16  2.219285E-12 -2.248915E-04 -9.389909E-06  1.511734E-03  1.464653E-12 *
*  4.482226E-14  2.228940E-04 -2.502440E-12 -1.484758E-10  1.464653E-12  1.510022E-03 *
***

A-SET RIGID BODY MASS MATRIX
***
*  4.288300E-05  0.000000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00  2.825136E-11 -1.784921E-06 *
*  0.000000E+00  4.288300E-05  0.000000E+00 -2.825136E-11  0.000000E+00  2.257000E-04 *
*  0.000000E+00  0.000000E+00  4.288300E-05  1.784921E-06 -2.257000E-04  0.000000E+00 *
*  0.000000E+00 -2.825136E-11  1.784921E-06  3.252599E-07 -9.394323E-06 -1.486914E-10 *
*  2.825136E-11  0.000000E+00 -2.257000E-04 -9.394323E-06  1.512190E-03 -1.175908E-12 *
* -1.784921E-06  2.257000E-04  0.000000E+00 -1.486914E-10 -1.175908E-12  1.512264E-03 *
***
    
```

Şekil 4-5: .f06 dosyası içeriği modal etkin kütle katılım oranı

T1 yönünde hiçbir kütle temsil edilmez. Bu, yapının kütlelerinin T1 yönünde hareket ettiği hiçbir modun olmadığı anlamına gelir. Bu yapıyı T1 yönünde dinamik olarak harekete geçirmek zor olacaktır ve bu yönde uygulanan herhangi bir yüklemeye muhtemelen hiçbir tepki vermeyebilir. T2 ve T3 yönlerinde, olası kütlelerin %91.1 ve %96.6 'sı ilk 10 mod tarafından temsil edilmektedir.

TOTAL EFFECTIVE MASS FRACTION
REFERENCE POINT AT ORIGIN OF BASIC COORDINATE SYSTEM

T1	T2	T3	R1	R2	R3
9.658039E-18	9.106091E-01	9.657330E-01	9.544342E-01	9.996986E-01	9.985170E-01

Şekil 4-6: .f06 dosyası içeriği 10 mode sayısı sonucunda toplamda tüm eksen yönlerindeki dinamik davranışa etkiyen toplam kütle katılım oranı değerleri

Mod sayısı 10 mod yerine 30 mod çözülsün, mevcut kütlelerin %85 'i T1 yönünde temsil edilirken T2 ve T3 yönleri %100 'e yükselir.

M O D A L E F F E C T I V E M A S S S U M M A R Y

TOTAL EFFECTIVE MASS FRACTION
REFERENCE POINT AT ORIGIN OF BASIC COORDINATE SYSTEM

T1	T2	T3	R1	R2	R3
8.497244E-01	9.990354E-01	1.000000E+00	1.000000E+00	1.000000E+00	9.999877E-01

Şekil 4-7: .f06 dosyası içeriği 30 mode sayısı sonucunda toplamda tüm eksen yönlerindeki dinamik davranışa etkiyen toplam kütle katılım oranı değerleri

Modal etkin kütle özetine ek olarak, her mod için kütle katılım sağlanır.

Kiriş örneğinde, mod 4 'ü belirtilen mod şekillerinin orijinal görsel incelemesi, T3 yönünde deformasyonlu bir "bending" modu şeklindedir. Dönüşümsel modal etkin kütle katılım oranlarını değerlendirdiğimizde, mod 4 'ün T1 ve T2 yönünde hareketi olmadığını ve kütlelerin sadece %0.04 'ünün T3 yönünde hareket ettiği gözlemlenmektedir.

MODAL EFFECTIVE MASS FRACTION
(FOR TRANSLATIONAL DEGREES OF FREEDOM)

MODE NO.	FREQUENCY	T1		T2		T3	
		FRACTION	SUM	FRACTION	SUM	FRACTION	SUM
1	2.784550E+01	1.986246E-41	1.986246E-41	5.009825E-16	5.009825E-16	6.432269E-01	6.432269E-01
2	8.110487E+01	9.026252E-34	9.026252E-34	6.431246E-01	6.431246E-01	1.646686E-16	6.432269E-01
3	1.716827E+02	2.562278E-42	9.026252E-34	1.533017E-15	6.431246E-01	1.990311E-01	8.422581E-01
4	3.987979E+02	9.291321E-39	9.026345E-34	8.356104E-12	6.431246E-01	4.098169E-04	8.426679E-01
5	4.732138E+02	6.241408E-39	9.026407E-34	2.246494E-15	6.431246E-01	6.780667E-02	9.104745E-01
6	5.009877E+02	2.159347E-33	3.061988E-33	1.990124E-01	8.421370E-01	1.620062E-14	9.104745E-01
7	9.043693E+02	6.805454E-37	3.062668E-33	1.251761E-13	8.421370E-01	3.474705E-02	9.452216E-01

Şekil 4-8: .f06 dosyası içeriği istenilen mode sayısı sonucunda tüm eksen yönlerindeki dinamik davranışa etkiyen kütle katılım oranı değerleri

Rotasyonel modal etkin kütle katılım oranlarından da görülebileceği gibi (aşağıdaki tabloda), mod 4, R1 yönündeki tüm kütlelerin %66.3 'üne sahiptir. Bu, kirişin eksenine etrafındaki dönüş karşılık gelir. Bu, mod 4 'ü orijinal deformasyonun önerdiği gibi bir "bending" bükülme modu değil, bir "torsional" burulma modu olarak tanımlamaya yardımcı olur.

**MODAL EFFECTIVE MASS FRACTION
(FOR ROTATIONAL DEGREES OF FREEDOM)**

MODE NO.	FREQUENCY	R1		R2		R3	
		FRACTION	SUM	FRACTION	SUM	FRACTION	SUM
1	2.784550E+01	1.484973E-01	1.484973E-01	9.704365E-01	9.704365E-01	6.124481E-16	6.124481E-16
2	8.110487E+01	4.042704E-11	1.484973E-01	1.948499E-16	9.704365E-01	9.703533E-01	9.703533E-01
3	1.716827E+02	5.929715E-02	2.077944E-01	2.488551E-02	9.953220E-01	1.698432E-15	9.703533E-01
4	3.987979E+02	6.633498E-01	8.711443E-01	3.129951E-07	9.953223E-01	5.275074E-13	9.703533E-01
5	4.732138E+02	2.670935E-03	8.738152E-01	3.223243E-03	9.985456E-01	1.148600E-16	9.703533E-01
6	5.009877E+02	2.422991E-12	8.738152E-01	1.835115E-16	9.985456E-01	2.495352E-02	9.953068E-01
7	9.043693E+02	8.491734E-03	8.823069E-01	8.347147E-04	9.993803E-01	4.033799E-15	9.953068E-01

Şekil 4-9: .f06 dosyası içeriği istenilen mode sayısı sonucunda dinamik davranışa etkileyen ilk torsion hareketini yakalayan mode 4

Tam 30 modlu çözümün çıktısını inceleyerek, T1 toplu kütle katılımını almak için 23. Modun gerekli olduğu görülmektedir. Belirli bir yönde istenen modsal kütle katılım oranını elde etmek için kaç modun gerekli olduğunu görmek için "Fraction" katılım oranı sütunu taranır. %90 modal etkin kütle baraj olsaydı, T1 yönü için daha fazla mod gerekirken, T2 yönü hedefe 9. Modda ve T3 yönüne 5. Modda ulaşmaktadır.

**MODAL EFFECTIVE MASS FRACTION
(FOR TRANSLATIONAL DEGREES OF FREEDOM)**

MODE NO.	FREQUENCY	T1		T2		T3	
		FRACTION	SUM	FRACTION	SUM	FRACTION	SUM
1	2.784550E+01	1.986246E-41	1.986246E-41	5.009825E-16	5.009825E-16	6.432269E-01	6.432269E-01
2	8.110487E+01	9.026252E-34	9.026252E-34	6.431246E-01	6.431246E-01	1.646686E-16	6.432269E-01
3	1.716827E+02	2.562278E-42	9.026252E-34	1.533017E-15	6.431246E-01	1.990311E-01	8.422581E-01
4	3.987979E+02	9.291321E-39	9.026345E-34	8.356104E-12	6.431246E-01	4.098169E-04	8.422581E-01
5	4.732138E+02	6.241408E-39	9.026407E-34	2.246494E-15	6.431246E-01	6.780667E-02	9.104745E-01
6	5.009877E+02	2.159347E-33	3.061988E-33	1.990124E-01	8.421370E-01	1.620062E-14	9.104745E-01
7	9.043693E+02	6.805454E-37	3.062668E-33	1.251761E-13	8.421370E-01	3.474705E-02	9.452216E-01
8	1.189049E+03	2.169722E-35	3.084366E-33	9.694279E-12	8.421370E-01	3.728939E-05	9.452589E-01
9	1.381379E+03	3.367139E-33	6.451505E-33	6.847201E-02	9.106091E-01	1.513553E-12	9.452589E-01
10	1.455059E+03	5.169395E-34	6.968444E-33	3.830078E-12	9.106091E-01	2.047413E-02	9.657330E-01
11	1.936433E+03	8.934572E-33	1.590302E-32	3.594904E-14	9.106091E-01	1.601772E-03	9.673348E-01
12	2.105677E+03	1.814249E-32	3.404551E-32	3.439521E-14	9.106091E-01	1.134252E-02	9.786773E-01
13	2.612831E+03	3.640822E-31	3.981277E-31	5.509754E-10	9.106091E-01	3.072235E-03	9.817495E-01
14	2.657073E+03	1.118529E-30	1.516657E-30	3.503041E-02	9.456395E-01	9.242964E-11	9.817495E-01
15	2.814735E+03	3.230758E-32	1.548964E-30	4.960297E-11	9.456395E-01	5.159944E-03	9.869095E-01
16	3.195627E+03	1.423042E-29	1.577939E-29	4.428951E-12	9.456395E-01	2.593069E-03	9.895026E-01
17	3.517574E+03	4.172559E-29	5.750497E-29	1.540106E-11	9.456395E-01	2.399540E-03	9.919021E-01
18	3.628481E+03	1.758759E-28	2.333808E-28	2.632713E-14	9.456395E-01	1.583850E-03	9.934860E-01
19	3.881179E+03	1.291730E-29	2.462981E-28	3.304885E-13	9.456395E-01	5.597858E-04	9.940457E-01
20	4.206037E+03	4.615286E-28	7.078268E-28	9.557534E-11	9.456395E-01	1.768778E-03	9.958145E-01
21	4.294399E+03	1.857567E-27	2.565394E-27	2.106229E-02	9.667018E-01	6.386844E-12	9.958145E-01
22	4.861386E+03	4.588772E-27	7.154166E-27	9.260903E-15	9.667018E-01	1.410476E-03	9.972250E-01
23	5.028497E+03	8.497244E-01	8.497244E-01	6.506055E-28	9.667018E-01	1.202953E-29	9.972250E-01
24	5.518394E+03	1.835899E-27	8.497244E-01	1.021861E-12	9.667018E-01	1.342164E-03	9.985672E-01
25	6.183576E+03	1.297706E-26	8.497244E-01	8.412414E-12	9.667018E-01	1.045130E-03	9.996123E-01
26	6.232623E+03	2.421005E-26	8.497244E-01	1.379040E-02	9.804922E-01	5.647625E-13	9.996123E-01
27	6.699623E+03	2.100492E-26	8.497244E-01	3.878667E-14	9.804922E-01	3.877158E-04	1.000000E+00
28	8.367273E+03	3.089761E-27	8.497244E-01	9.297293E-03	9.897895E-01	8.631456E-15	1.000000E+00
29	1.051661E+04	3.324099E-25	8.497244E-01	6.011815E-03	9.958013E-01	5.722273E-15	1.000000E+00
30	1.240291E+04	4.120979E-26	8.497244E-01	3.234168E-03	9.990354E-01	3.116753E-15	1.000000E+00

Şekil 4-10: .f06 dosyası içeriği istenilen mode sayısı sonucunda tüm eksen yönlerindeki dinamik davranışa etkileyen toplam kütle katılım oranı değerleri

Fringe: RUN_MODEL_CHECKS.SC1, A1:Mode 4 : Freq. = 398.8, Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)
Deform: RUN_MODEL_CHECKS.SC1, A1:Mode 4 : Freq. = 398.8, Eigenvectors, Translational,



Şekil 4-11: Mode 4 'te Torsion hareketini sağlayan frekans değeri için post process görüntüsü

5. REFERANSLAR

- I. MSC Nastran Quick Reference Guide 2022.1
- II. Dynamic Analysis User Guide 2022.1