

MSC NASTRAN'DA SONLU ELEMAN MODEL KONTROL YÖNTEMLERİ

HAZIRLAYAN

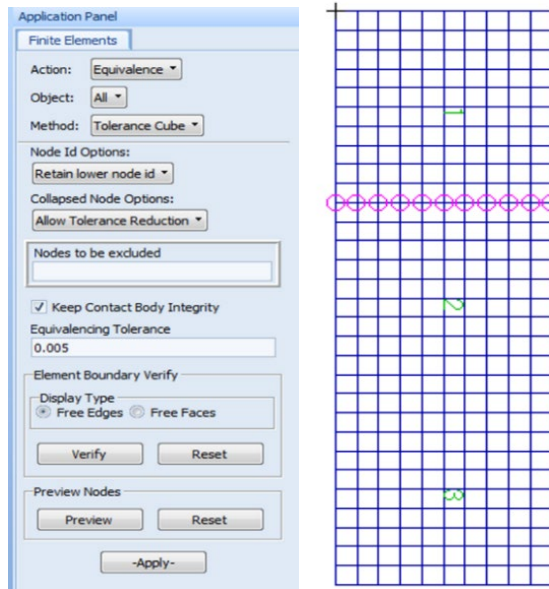
Ömer ALAN
Yapısal Analiz Mühendisi

Yayın Tarihi: 31.05.2022

Sonlu elemanlar metoduyla yapılacak analizlerde, modellerinin matematiksel doğruluğunu kontrol etmek amacı taşıyan bir dizi kontrol yöntemi mevcuttur. Bu kontrol yöntemleri, analiz modellerinin fiziksel temsil kabiliyeti ve matematiksel olarak uygunluğunun denetlenmesi açısından hayati önem taşır. Bu doküman, hatalı modellerin nasıl tespit edileceğini ve bu durumların MSC Nastran ve Patran yardımıyla nasıl düzeltilebileceğini içermektedir.

1. EQUIVALANCE KONTROLÜ

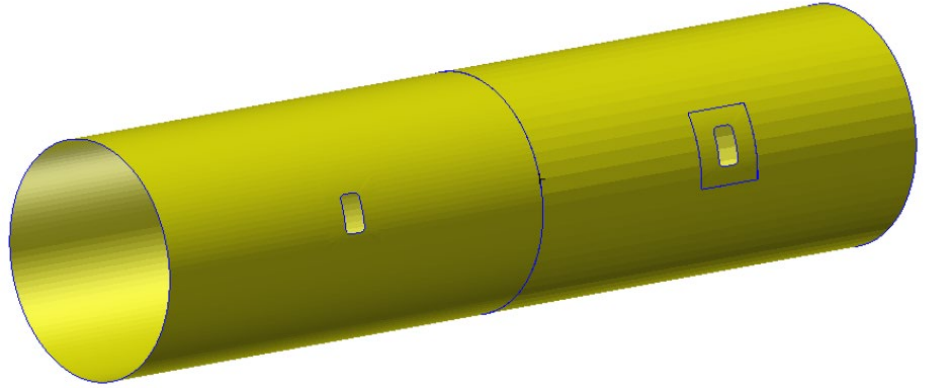
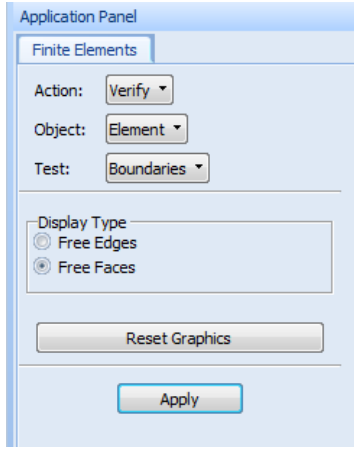
Analiz için kullanılacak sonlu eleman ağında, duplike node bulunmaması gerekir. Bu tip hatalar analiz modelindeki fiziksel bütünlüğü ve devamlılığın ihlaline sebep olur. Çakışık node'lar ve mesh crack, yapısı itibariyle görülmesi, fark edilmesi oldukça zor olan hatalardır. Patran, EQUIVALANCE aracıyla bu hataların tespitini ve düzeltilmesini sağlar. Modelin bütünlüğü ve devamlılığı kontrol edilirken EQUIVALANCE aracı mutlaka kullanılmalıdır.



Görsel 1 – MSC Patran Equivalence Aracı ve Ön İzleme Görünümü

2. SERBEST KENAR KONTROLÜ

MSC Patran, sonlu elemanlar ağındaki açık kenara sahip elemanları renklendirerek vurgulayabilir. Patran'ın bu yeteneği, kullanıcılara bir model kontrol yöntemi imkânı sunmaktadır. Serbest kenar (Free Edge) kontrolü yapılarak analiz modelinin üzerindeki açıklıkların, elemanların arasındaki boşlukların kontrolü sağlanabilir ve var olması gereken açık kenarlardan farklı açık kenarların, eksik elemanların tespiti kolay bir şekilde yapılabilir. Serbest kenar kontrolü, "Verify" isimli araç yardımıyla yapılmaktadır. Aynı zamanda farklı yüzeyleri birleştiren kenarların da serbestliği bu araç yardımıyla kontrol edilebilir. Serbest kenar kontrolü, equivalence kontrolü ile bağlantılı bir kontrol yöntemi olarak düşünülebilir.



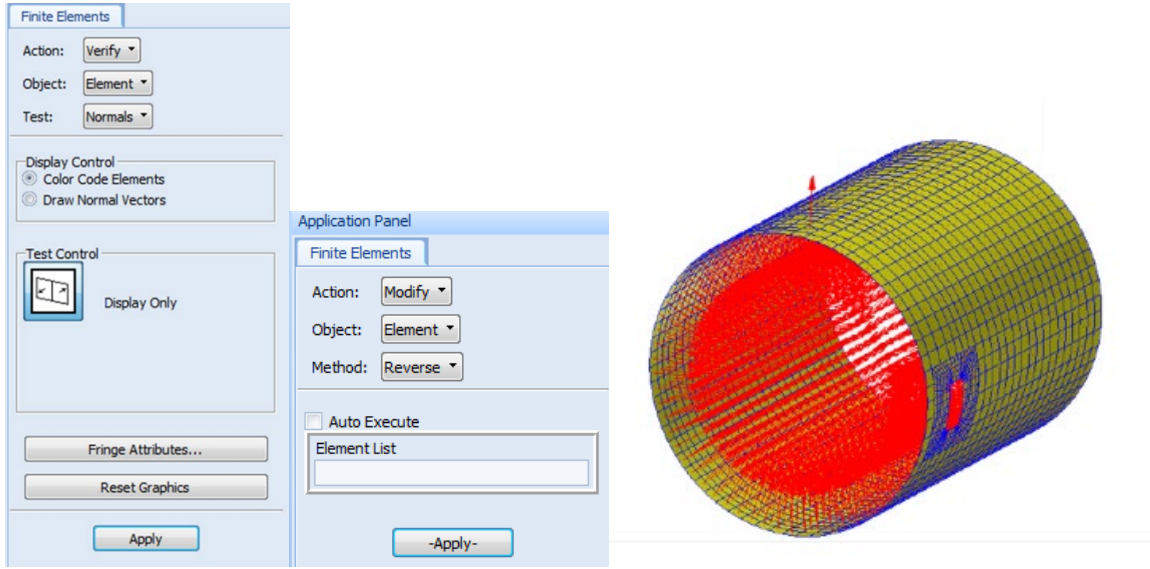
Görsel 2 – Serbest Kenar Kontrolü Aracı ve Örnek Görünümü

3. ELEMEN NORMALLERİNİN KONTROLÜ

Analiz modelinde aynı parçalar üzerindeki elemanların normallerinin farklı yönlerde olması modelleme sırasında hatalara neden olabilir. Bu hatalar başlıca aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- offset kullanımında oluşabilecek kalınlık uyumsuzluğu,
- yayılı yük girdilerinde yükün yönünün farklı girilmesi,
- top-bottom layer (Z1-Z2) bölgelerindeki düzensizlik

Bu nedenle eleman normalleri kontrol edilmeli ve aynı olmalarına dikkat edilmelidir. Eleman normalleri MSC Patran programında "Verify" aracı yardımıyla kolay bir şekilde görselleştirilebilmektedir ve "Modify" aracı yardımıyla kolay bir şekilde düzeltilebilmektedir.



Görsel 3 – Eleman Normallerini Görselleştirme ve Değiştirme Örneği

4. EPSILON DEĞERİNİN KONTROLÜ

Analizin error'suz tamamlanması başarılı bir analizin yapıldığı anlamına gelmez. Analiz yapıldıktan sonra da model kontrolü yapılabilir. Bu tür model kontrol yöntemlerinden birisi de Epsilon değerinin kontrolüdür. Epsilon değeri lineer-statik analizlerde yuvarlama hatasından kaynaklı nümerik hatalardır. Epsilon değeri, analizin çözüm dosyasıyla verilen dosyalar arasında F06 dosyasına kaydedilir ve aşağıdaki formüllerle hesaplanır. Epsilon değeri sıfıra ne kadar yakınsa nümerik hata o kadar azdır. Epsilon değerinin E-9'dan küçük bir sayı olması beklenir. E-9'dan büyük Epsilon değerine sahip analizler güvenilirlik açısından zayıftır.

$$K \times u = P \quad \Delta P = K \times u - P \quad \varepsilon = \frac{u^T \times \Delta P}{u^T \times P}$$

```

*** SYSTEM INFORMATION MESSAGE 6916 (DFMSYN)
    DECOMP ORDERING METHOD CHOSEN: BEND, ORDERING METHOD USED: BEND

*** SYSTEM INFORMATION MESSAGE 4159 (DFMSA)
    THE DECOMPOSITION OF KLL      YIELDS A MAXIMUM MATRIX-TO-FACTOR-DIAGONAL RATIO OF    3.207743E+01

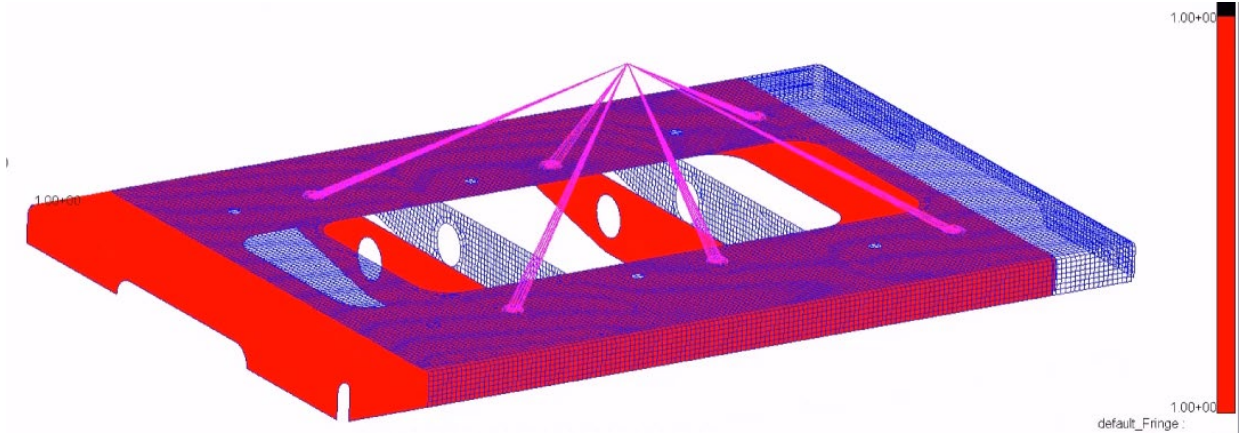
*** USER INFORMATION MESSAGE 5293 (SSG3A)
    FOR DATA BLOCK KLL
    LOAD SEQ. NO.      EPSILON      EXTERNAL WORK      EPSILONS LARGER THAN 0.001 ARE FLAGGED WITH ASTERISKS
      1                -2.4335945E-16  2.3291384E-05
      2                 2.3654757E-15  1.0949861E-04
      3                -1.3389528E-13  4.1421023E-03

1  CDR LOAD CYCLE
0
    
```

Görsel 4 – F06 Dosyası İçerisindeki Epsilon Değeri Örneği

5. BİRİM YER DEĞİŞTİRME KONTROLÜ

Modelin bütünlüğünü ve devamlılığı kontrol etmek amacıyla, birim yer değiştirme kontrolü kullanılabilir. Bu yöntemde, sonlu elemanlar ağına ait herhangi bir node üzerine sırasıyla, X, Y ve Z yönünde 1'er birimlik enforced motion yükü verilir. Modelin tepkisi olarak da yine sırasıyla X, Y ve Z yönünde 1'er birimlik deplasman değerleri okunmalıdır. Bu deplasman, model üzerinde bütünsel olarak gerçekleşmelidir. Hiçbir elemenda aykırı bir deplasman değeri görülmemelidir.



Görsel 5 –Bir Birimlik Yer Değiştirme Kontrolü Örneği

Aynı zamanda F06 dosyasının OLOAD çıktısı bölümünde, X, Y ve Z ekseninde toplam yük sıfır olmalıdır.

SUBCASE/		LOAD		OLOAD			RESULTANT		
DAREA ID		TYPE	T1	T2	T3	R1	R2	R3	
0	1	FX	0.000000E+00	----	----	----	0.000000E+00	0.000000E+00	
		FY	----	0.000000E+00	----	0.000000E+00	----	0.000000E+00	
		FZ	----	----	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	----	
		MX	----	----	----	0.000000E+00	----	----	
		MY	----	----	----	----	0.000000E+00	----	
		MZ	----	----	----	----	----	0.000000E+00	
		TOTALS	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	
0	2	FX	0.000000E+00	----	----	----	0.000000E+00	0.000000E+00	
		FY	----	0.000000E+00	----	0.000000E+00	----	0.000000E+00	
		FZ	----	----	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	----	
		MX	----	----	----	0.000000E+00	----	----	
		MY	----	----	----	----	0.000000E+00	----	
		MZ	----	----	----	----	----	0.000000E+00	
		TOTALS	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	
0	3	FX	0.000000E+00	----	----	----	0.000000E+00	0.000000E+00	
		FY	----	0.000000E+00	----	0.000000E+00	----	0.000000E+00	
		FZ	----	----	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	----	
		MX	----	----	----	0.000000E+00	----	----	
		MY	----	----	----	----	0.000000E+00	----	
		MZ	----	----	----	----	----	0.000000E+00	
		TOTALS	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	
1	MSC.NASTRAN JOB CREATED ON 01-SEP-21 AT 14:27:19			SEPTEMBER 1, 2021			MSC Nastran 8/ 4/20		
0									SUBCASE 1

Görsel 6 – Örnek F06 Dosyası OLOAD Çıktısı Kontrolü

6. BİRİM İVME KONTROLÜ

Modelin statik davranışının tutarlılığını kontrol etmek amacıyla birim yer çekimi kontrolü yapılabilir. Bu yöntemde model, bir node üzerinden bütün serbestlik derecelerinde uzaya sabitlenir. Modele X, Y ve Z yönlerinde birim ivme yükü tanımlanır ve analiz bu şekilde gerçekleştirilir. Analiz sonucunda F06 dosyasının OLOAD kısmında X, Y ve Z yönünde aynı kuvvet değerleri okunması beklenir. Eğer farklı kuvvet değerleri okunuyorsa model üzerinde bir hata yapılmış olması muhtemeldir.

0		OLOAD			RESULTANT			
SUBCASE/ DAREA ID	LOAD TYPE	T1	T2	T3	R1	R2	R3	
0	1	FX	5.760003E+00	----	----	2.152414E-01	-9.043217E-01	
		FY	----	1.262480E-22	----	-6.700921E-25	4.017664E-23	
		FZ	----	----	5.123738E-22	2.665965E-23	-1.804026E-22	
		MX	----	----	0.000000E+00	----	----	
		MY	----	----	----	0.000000E+00	----	
		MZ	----	----	----	----	0.000000E+00	
		TOTALS	5.760003E+00	1.262480E-22	5.123738E-22	2.598956E-23	2.152414E-01	-9.043217E-01
0	2	FX	-1.252733E-22	----	----	-6.708232E-25	1.413765E-23	
		FY	----	5.760003E+00	----	-2.152414E-01	1.422606E+00	
		FZ	----	----	3.392733E-23	1.637865E-23	1.751836E-24	
		MX	----	----	0.000000E+00	----	----	
		MY	----	----	----	0.000000E+00	----	
		MZ	----	----	----	----	0.000000E+00	
		TOTALS	-1.252733E-22	5.760003E+00	3.392733E-23	-2.152414E-01	1.081013E-24	1.422606E+00
0	3	FX	4.896263E-22	----	----	-3.672183E-25	-4.712904E-23	
		FY	----	-6.367998E-23	----	-4.776064E-26	6.726438E-23	
		FZ	----	----	5.760003E+00	9.043217E-01	-1.422606E+00	
		MX	----	----	0.000000E+00	----	----	
		MY	----	----	----	0.000000E+00	----	
		MZ	----	----	----	----	0.000000E+00	
		TOTALS	4.896263E-22	-6.367998E-23	5.760003E+00	9.043217E-01	-1.422606E+00	2.013535E-23

Görsel 7 – Örnek F06 Dosyası OLOAD Çıktısı Kontrolü


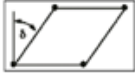
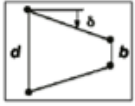
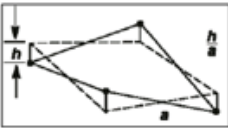
7. MODAL ANALİZ KONTROLÜ

Model kontrolü yapmanın farklı bir yolu da modal analiz yapmaktır. Model, hiçbir sınır koşuluna maruz bırakılmadan, doğal frekansları hesaplanmak üzere modal analize tabii tutulur. Analizden sonra F06 dosyası incelenir ve dosyanın içinde REAL EIGENVALUES kısmında CYCLES sütunu incelenir. Bu sütunda modelin normal modları sırasıyla listelenmiştir. Bu analiz sonucunda modelden beklentimiz, ilk altı modunun sıfıra çok yakın değerler olmasıdır. Model, altı serbestlik derecesinde deforme olamadan hareket edecektir. Bu durum “Rigid Body Motion” ismiyle de bilinir. Model içinde bağlantısı olmayan elemanlar varsa altıdan fazla sayıda sıfıra yakın mod görülebilir.

MODE NO.	EXTRACTION ORDER	EIGENVALUE	REAL EIGENVALUES		GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS
			RADIANS	CYCLES		
1	1	-5.071633E-07	7.121540E-04	1.133428E-04	1.000000E+00	-5.071633E-07
2	2	-2.151355E-07	4.638270E-04	7.382036E-05	1.000000E+00	-2.151355E-07
3	3	-1.753797E-07	4.187836E-04	6.665148E-05	1.000000E+00	-1.753797E-07
4	4	-1.181033E-07	3.436617E-04	5.469545E-05	1.000000E+00	-1.181033E-07
5	5	-8.736970E-08	2.955837E-04	4.704360E-05	1.000000E+00	-8.736970E-08
6	6	9.592623E-08	3.097196E-04	4.929340E-05	1.000000E+00	9.592623E-08
7	7	7.258765E+06	2.694209E+03	4.287968E+02	1.000000E+00	7.258765E+06
8	8	1.573491E+07	3.966726E+03	6.313240E+02	1.000000E+00	1.573491E+07

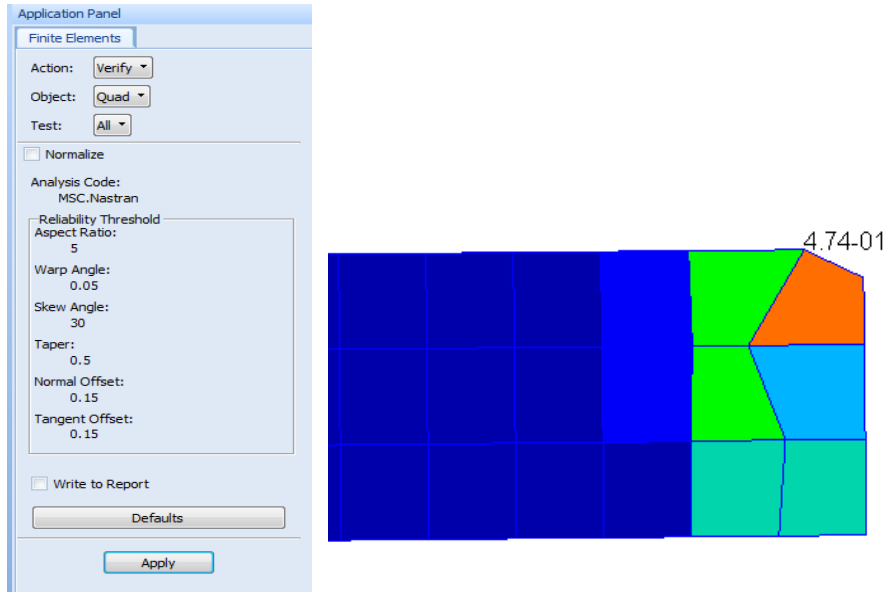
8. ELEMAN KALİTESİ KONTROLÜ

Eleman kalitesi, analiz sonuçlarının güvenilirliği açısından çok önemlidir. Eleman kalitesi kenarların birbirine göre açısı ve uzunluklarının oranı gibi birçok farklı yaklaşımla değerlendirilir. MSC Patran ve MSC Nastran bu değerlendirmeleri otomatik olarak yapabilmektedir. İdeal elemanlar, eşit kenar uzunluklarına ve eşit köşe açılarına sahip burulma içermeyen elemanlardır. Bu ideal durum her zaman sağlanamamaktadır. Buna karşın eleman kalitesi ölçütlerinde kabul edilebilir aralıklar mevcuttur.

Aspect ratio	 $\frac{a}{b}$	Reasonable Limits <ul style="list-style-type: none"> • Up to 10:1 • Normally < 4:1 $\delta \leq 20 - 30^\circ$ $T_3/Q_3 = 0.5 - 0.75$ <ul style="list-style-type: none"> • T_3 : Largest of the areas of triangles formed at each corner grids. • Q_3 : Area of the quadrilateral. <ul style="list-style-type: none"> • Up to ~5% is acceptable normally • No real limit, but element does not include warpage
Skew		
Taper (2 directions)		
Warp	 $\frac{h}{a}$	

Görsel 8 – Başlıca Eleman Kalitesi Ölçütleri ve Limitleri

Aşağıdaki resimde, MSC Patran kullanarak bahsedilen ölçütlerin nasıl kontrol edilebileceği yer almaktadır.



Görsel 9 – MSC Patran Üzerinden Eleman Kalitesi Kontrolü Örneği

Yukarıda bahsedilen kalite kontrollerinin yapılması için BDF dosyası içinde "GEOMCHECK" komutu kullanılır. Bu komutla beraber, eleman kalitesi değerleri F06 doyasına yazdırılır. Default kalite aralıklarının yanında kullanıcıya da aralık belirleme imkânı sunulur. Detaylı bilgi için Quick Reference Guide dokümanının ilgili bölümü incelenebilir.

```

*** USER INFORMATION MESSAGE 7555 (GMTSTD)
FINITE ELEMENT GEOMETRY CHECK RESULTS EXCEED TOLERANCE LEVELS FOR THE FOLLOWING ELEMENTS. METRIC VALUES THAT EXCEED
TEST TOLERANCE LIMITS ARE IDENTIFIED BY ONE OF THE FOLLOWING FLAGS PLACED TO THE RIGHT OF THE METRIC VALUE.
"++++" FOR TEST RESULTS EXCEEDING TOLERANCES. INFORMATIONAL ONLY. PROBLEM SOLUTION CONTINUES. (DEFAULT FLAG)
"IGNR" FOR TEST RESULTS EXCEEDING TOLERANCES. INFORMATIONAL ONLY. PROBLEM SOLUTION CONTINUES.
"WARN" FOR TEST RESULTS EXCEEDING TOLERANCES. INFORMATIONAL ONLY. PROBLEM SOLUTION CONTINUES.
"FAIL" FOR TEST RESULTS EXCEEDING TOLERANCES. SEVERE ERROR. PROBLEM SOLUTION TERMINATES.
USER ACTION: USE THE GEOMCHECK (EXECUTIVE CONTROL STATEMENT) KEYWORD=VALUE TO CHANGE TOLERANCE VALUES IF DESIRED.

```

ELEMENT GEOMETRY TEST RESULTS SUMMARY									
ELEMENT TYPE	SKEW ANGLE	ASPECT/		TOTAL NUMBER OF TIMES TOLERANCES WERE EXCEEDED		SURFACE/FACE	OFFSET RATIO	EDGE POINT LENGTH RATIO	JACOBIAN DETERMINANT
		TAPER RATIO	INTER. ANGLE	MINIMUM	MAXIMUM				
BAR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	N/A	N/A
BEAM	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	N/A	N/A
QUAD4	0	277	9	68	93	N/A	N/A	N/A	N/A
TRIA3	6	N/A	N/A	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

N/A IN THE ABOVE TABLE INDICATES TESTS THAT ARE NOT APPLICABLE TO THE ELEMENT TYPE AND WERE NOT PERFORMED. FOR ALL ELEMENTS WHERE GEOMETRY TEST RESULTS HAVE EXCEEDED TOLERANCES,

QUAD4	ELEMENT ID	172017	PRODUCED LARGEST TAPER RATIO	OF	0.91	(TOLERANCE = 0.50).
QUAD4	ELEMENT ID	193098	PRODUCED SMALLEST INTERIOR ANGLE	OF	19.37	(TOLERANCE = 30.00).
QUAD4	ELEMENT ID	272017	PRODUCED LARGEST INTERIOR ANGLE	OF	173.46	(TOLERANCE = 150.00).
QUAD4	ELEMENT ID	295034	PRODUCED LARGEST WARP FACTOR	OF	0.09	(TOLERANCE = 0.05).
TRIA3	ELEMENT ID	258748	PRODUCED SMALLEST SKEW ANGLE	OF	6.69	(TOLERANCE = 10.00).

Görsel 10 – F06 Dosyasında Eleman Kalite Kontrolü Çıktısı Örneği

9. PARAM AUTOSPC KONTROLÜ

AUTOSPC kartı, modeldeki tüm node'ların tekiliğini test eder ve test sonucunu F06 dosyasındaki Grid Point Singularity Table isimli tabloya kaydeder. Bu kart aynı zamanda katılığı sıfır veya sıfıra çok yakın olan node'lardaki serbestlik derecelerini sınırlandır. Bu sınırlandırma modelleme hatalarını gizleyebilir. Default olarak aktif olan bu kartın BDF dosyası üzerinden kapatılması önerilmektedir. Detaylı bilgi için Quick Reference Guide dokümanındaki ilgili bölüm incelenebilir.

GRID POINT SINGULARITY TABLE									
POINT ID	TYPE	FAILED		STIFFNESS		OLD USET		NEW USET	
		DIRECTION	RATIO	EXCLUSIVE	UNION	EXCLUSIVE	UNION		
1001	G	1	0.00E+00	B	F	SB	S	*	
1001	G	2	0.00E+00	B	F	SB	S	*	
1001	G	3	0.00E+00	B	F	SB	S	*	
1001	G	4	0.00E+00	B	F	SB	S	*	
1001	G	5	0.00E+00	B	F	SB	S	*	
1001	G	6	0.00E+00	B	F	SB	S	*	
1002	G	4	0.00E+00	B	F	SB	S	*	
1002	G	5	0.00E+00	B	F	SB	S	*	
1002	G	6	0.00E+00	B	F	SB	S	*	

Görsel 11 – F06 Dosyasında Grid Point Singularity Table Çıktısı Örneği