

MSC NASTRAN İLE TEMEL ROTORDİNAMİK UYGULAMALARI

Hazırlayan
Ömer Alan Yapısal Analiz Mühendisi

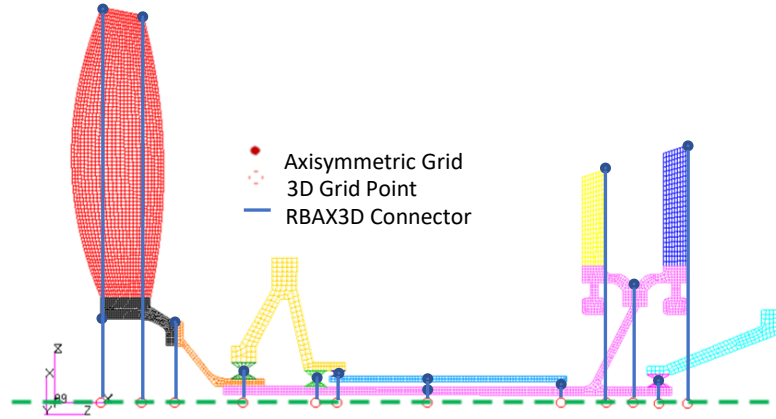
Tarih: XX/05/2023

Giriş

Rotordinamik analizler, gaz türbinleri başta olmak üzere tüm döner makineler için oldukça önemlidir. Yapıların dönme hareketi, dinamik karakteristiğini etkilemektedir. Bu noktada MSC Nastran'ın dinamik analiz kabiliyetlerinin oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. Dinamik analizlere dönme hareketinin etkilerinin de dahil edilmesiyle rotordinamik analizleri gerçekleştirilmektedir. MSC Nastran'ın rotordinamik analiz kabiliyetleri oldukça geniştir ve bu alanda ürün geliştiren birçok öncü firma tarafından tercih edilmektedir. FEM düzleminde rotorları ve statorları net olarak temsil edebilmekteyiz. Bununla beraber Nastran, modele uygun analiz ortamı hazırlamak için kolay ve kullanışlı kartlara sahiptir. Bu yazımızda Nastran'ın temel rotordinamik kabiliyetleri ve uygulamalarından bahsedeceğiz.

Modelleme

Rotor ve statorlar 1D, 2D veya 3D elemanlarla modellenebilmektedir. 1D elemanlarla modelleme yapıldığı zaman, tüm şaftı temel parçalara kesitler halinde bölme işlemi yapılmaktadır. Kullanılan 1D elemanlarla (CBAR, CBEAM, CBUSH vb.) şaft ve CONM2 elemanlarla diskler noktasal kütle olarak temsil edilebilir. Bu denli pratik bir yaklaşımda, tasarım üzerine gelen bir güncelleme, 1D elemanların property tanımlarında küçük değişiklikler yapılmasıyla sonlu elemanlar modeline aktarılabilir ve böylece basit değişikliklerin etkisi çok hızlı görülebilmektedir.



Şekil 1: 2D Rotor Modeli

Genel olarak jiroskopik etkiler önemli olduğu için modelleme esnasında tüm eksenlerdeki atalet değerleri dikkatlice girilmelidir.

Eğer yapı 2D modellemek isteniyorsa klasik 2D elemanlar (CQUAD, CTRIA) kullanılamaz. Bu elemanların harmonik versiyonları olan CQUADX ve CTRIAX elemanları kullanılabilir. Elemanların property tanımları için aksisimetrik bir property kartı olan PAXSYMH kartı kullanılabilirken, bağlayıcı eklemek için de RBAX3D tipi bağlayıcı kullanılabilir. Bu modelleme yöntemi yapının aksisimetrik bir yapıda olduğunun varsayımına dayanmaktadır.

3D modellemede herhangi bir kısıt bulunmamaktadır. Rotor ve statorların en ayrıntılı modeli, 3D elemanlarla yapılabilmektedir. 3D modelleme, analizin fixed reference frame veya rotating reference frame üzerinden yapılabilme seçeneklerini sunmaktadır. Blade ve disklerin titreşim analizlerinin yapılabilmesini sağlayabilir. Rotorların normal modları coupled olduğu zaman 3D modelleme yapmak gerekli hale gelmektedir.

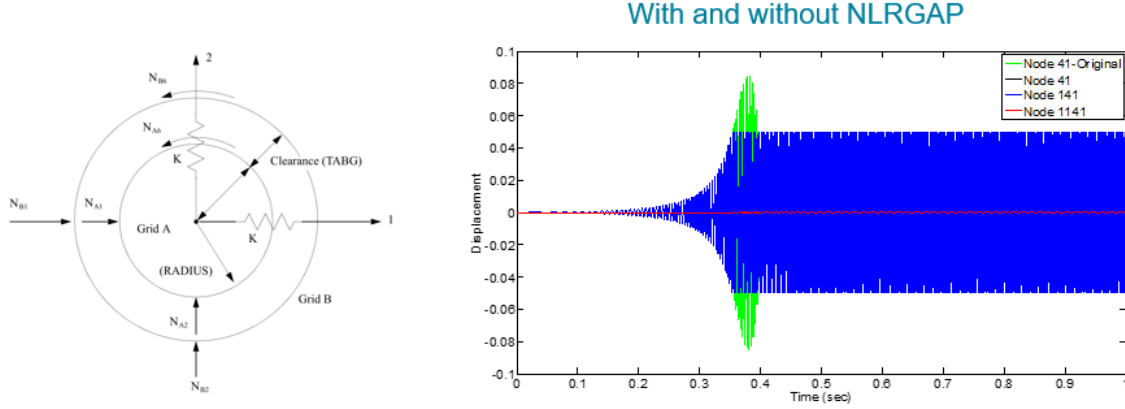
Rotorlar veya statorlar süper eleman olarak tanımlanabilmektedir. Bu şekilde analizlerin süreleri ciddi bir şekilde azaltılabilmektedir.

Reference frame tercihi göre sonlu elemanlar modelinin simetrik olması gerekebilir. Bu nedenle kaçık kütle veya imalat hatalarını mesh üzerinde modellemektense bunun için özel olarak kullanılan property tanımları üzerinden modellemek tercih edilebilmektedir.

Tablo 1: Reference Frame-Simetri ilişkisi

Rotor	Stator	Reference Frame
Symmetric	Symmetric	Fixed or Rotating
Symmetric	Not symmetric	Fixed Only
Not symmetric	Symmetric	Rotating Only
Not symmetric	Not symmetric	N/A

Rulman ve casing modellenmesi önemlidir. Bu elemanların katılıkları doğrudan şafta aktarılabilmektedir. Bahsedilen katılıklar CELASi veya CGAP gibi elemanlar yardımıyla modellenebilmektedir. Örneğin bir transient cevap analizde gap eleman tipi bir girdiyle (bknz: NLRGAP, NLRISFD kartları) cevabı kısıtlanmazsa, daplasmam cevabı sürekli büyüme eğilimi gösterecektir.



Şekil 2: 1D Gap Elemanın Cevap Üzerindeki Etkisi

Sıkça Kullanılan Nastran Kartları

RGYRO	Rotorları subcase'ler içine çağırmak için kullanılan karttır. Case Control kısmına eklendiğinde rotordinamik modülü aktif edilmiş olur. Rotorların dönme hızı bu kartla tanımlanabilir.
ROTOR(G)(AX)	Rotor domaininin tanımlandığı karttır. Bu kart yardımıyla seçilen elemanlar veya node'lar rotor olarak tanımlanacaktır. ROTOR kartı 3D modeller için, ROTORAX kartı 2D modeller için ve ROTORG kartı 1D modeller için kullanılabilir.
RSPINR	Rotorun dönme davranışının, hangi ekseninde ve ne hızda döneceğinin frekans düzleminde tanımlandığı karttır. Sabit bir değer atanabilmekle birlikte, bir tabloya bağlı değişken olarak tanımlanabilir.
RSPINT	Rotorun dönme davranışının, hangi ekseninde ve ne hızda döneceğinin zaman düzleminde tanımlandığı karttır. Sabit bir değer atanabilmekle birlikte, bir tabloya bağlı değişken olarak tanımlanabilir.
UNBALNC	Eksenel kaçık kütlelerin tanımlanabildiği karttır. Ayrıntılı bilgi için Quick Reference Guide dokümanına başvurulabilir.
ROTORSE	Rotorları süper elemanlara indirgemek için kullanılan karttır.
CAMPBLL	Campbell diyagramını otomatik bir şekilde çıkartmaya yaramaktadır. DDVAL kartı ile beraber çalışmaktadır. Patran arayüzünde Utilities-> Results-> Campbell Diagram seçenekleriyle oluşturulan grafik çıktı alınabilir.

Aşağıdaki tablodan jenerik olarak hangi kartların hangi analizlerde kullanılması gerektiği takip edilebilir.

Tablo 2: Analiz Tipleri ve Gerekli Nastran Kartları

Entry	Static	Complex Eigenvalue	Frequency Response	Transient Response
ROTORG	*	*	*	*
RGYRO	*	*	*	
RSPINR	*	*	*	
RSPINT				*
UNBALNC			* (optional)	* (optional)
ROTORSE	*	*	*	*

Nastran'ın Rotordinamik Analiz Yaklaşımı

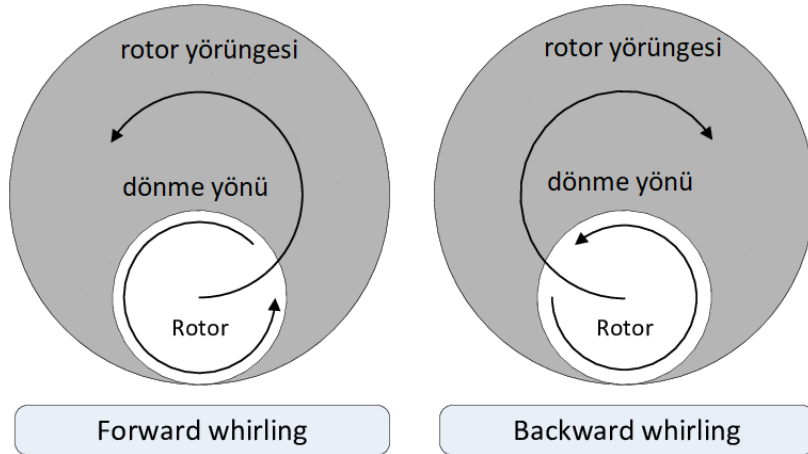
Rotordinamik analizlerde genel olarak complex eigen value problemi çözülmüş olur. Bu analizin üstüne frekans cevap analizi veya transient cevap analizi de gerçekleştirilebilir. Direct tabanlı frekans veya transient cevap analizi de gerçekleştirilebilir. Her dinamik analizde olduğu gibi sönümlenme yaklaşımları çok önemli bir rol oynamaktadır. Senaryolarda aşağıdaki sönümler eklenebilir:

- Modal sönümlenme: SDAMP ve TABDMP1 kartları yardımıyla yapının doğal frekanslarından türetilen modal sönümlenme değerleri eklenebilmektedir.
- Yapısal sönümlenme: Temel olarak yapının deplasmanına bağlı olarak oluşan sönümlenme değerleri eklenebilir.
- Viskoz sönümlenme: Bir katsayıya bağlı olarak linear veya bir tabloya bağlı olarak nonlinear olarak tanımlanabilmektedir. CDAMP, CVISC kartları yardımıyla veya property kartları yardımıyla viskoz sönümlenme oluşturulabilir.
- Rayleigh Sönümlenme: Katılık veya kütle matrisinden türetilen bir sönümlenme tanımıdır. PSPINR/PSPINT, ALPHA1R/ALPHA2R alanları üzerinden bu sönümlenme tanımları yapılabilmektedir. Ayrıntılı bilgi için Quick Reference Guide dokümanına başvurmanız tavsiye edilir.
- Malzeme Sönümlenmesi: Yukarıdaki maddelere ek olarak, malzeme kartları içinde tanımlanan sönümlenme katsayılarıyla da sönümlenme modellenebilir.

Complex eigen value analizi senkron ve asenkron olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Asenkron analiz, girdi olarak verilen dönme hızının yapının doğal frekansına olan etkisini göstermektedir. Temel olarak bir sine sweep analizidir. Senkron analiz ise dönme hızının yapının doğal frekanslarına eşit olduğu varsayımıyla yapılan analizdir. Aynı zamanda yapının doğal frekansıyla dönme hızının aynı olduğu hızlara kritik hız denir. Analizin senkron veya asenkron analiz olması RGYRO kartı yardımıyla tanımlanabilir. Aşağıda complex eigen value hareket denklemi yer almaktadır. Senkron analizde $\omega = \Omega$ eşitliği sağlanarak çözüm alınırken asenkron analizde bu eşitlik sağlanmadan çözüm alınır.

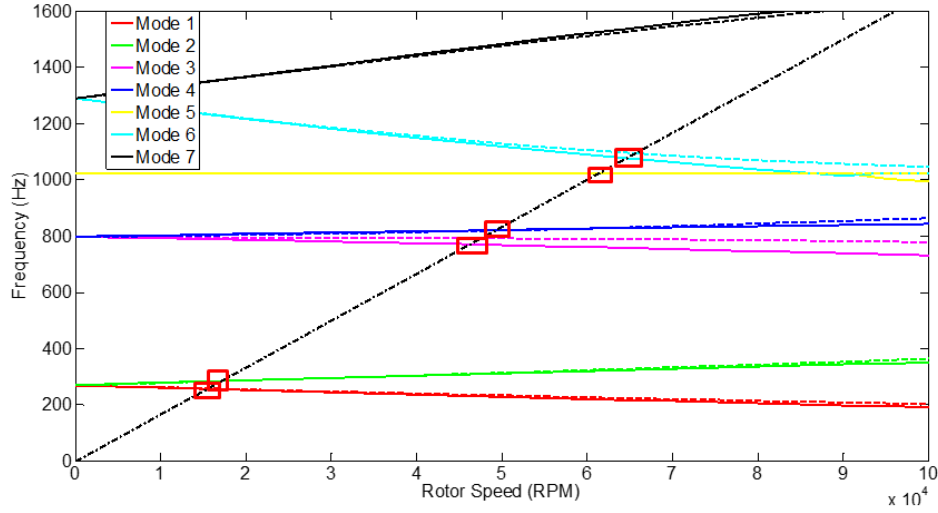
$$[M]\{\ddot{g}\} + ([B_s] + [B_R] + \Omega[G])\{\dot{g}\} + ([K] + \Omega[K_C]_R + \Omega^2[K_G])\{g\} = \{F_s\}$$

Motora dönme hızı kazandırıldıktan itibaren her mod iki farklı mod halinde ayrılmaya başlamaktadır. Modların sayısının ikiye katlanmasının sebebi dönme hızıyla birlikte, forward whirl ve backward whirl hareketlerinin oluşmaya başlamasıdır. Doğal frekans değerleri incelendiğinde, iki farklı mod haline gelen frekanslardan düşük olan frekans backward whirl modunu, yüksek olan frekans ise forward whirl modunu temsil etmektedir. Campbell diyagramında, dönme hızıyla birlikte yukarı doğru kayan doğal frekanslar forward whirl modlarını, aşağıya doğru kayan doğal frekanslar ise backward whirl modlarını göstermektedir.



Şekil 3: Forward-Backward Whirl Hareketleri

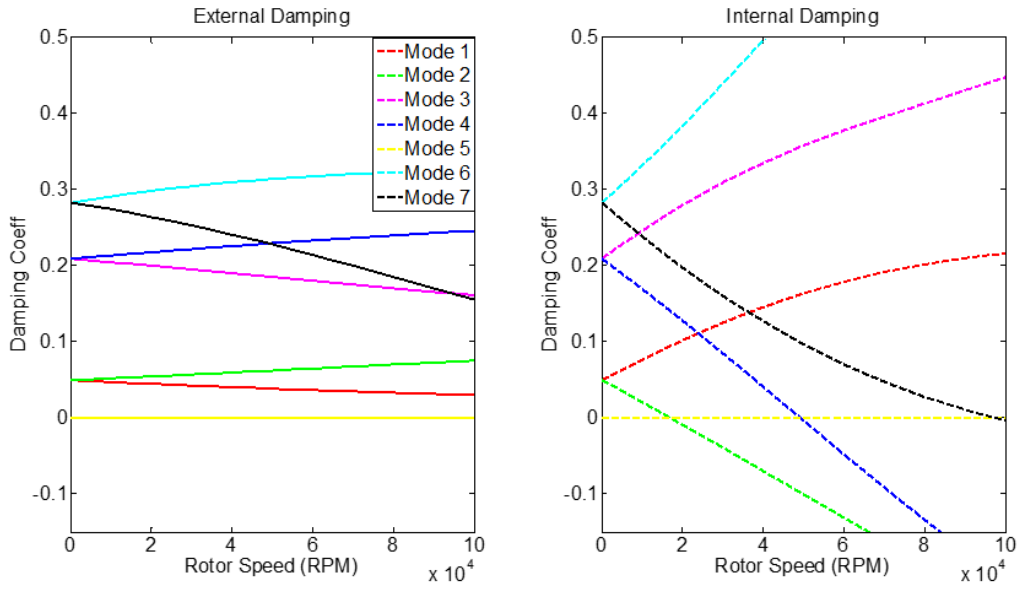
Dönme hızının modlara olan etkisini gösteren tabloya Campbell Diyagramı adı verilir. Campbell diyagramı, yapının genel rotordinamik davranışları hakkında bilgi verdiği için büyük öneme sahiptir. Aşağıdaki görselde bir Campbell Diyagramı örneği gösterilmektedir. Örnek diyagramda dönme hızı arttıkça modların değişmesini ve çift hale gelmesi görülebilir. Aynı zamanda grafiğe eklenen bir $x=y$ çizgisiyle dönme hızlarının tahrik frekansına eşit olduğu noktalar yani kritik hızlar tespit edilebilir. Kritik hızlar kırmızı kutu içinde vurgulanmıştır.



Şekil 4: Campbell Diyagramı Örneği

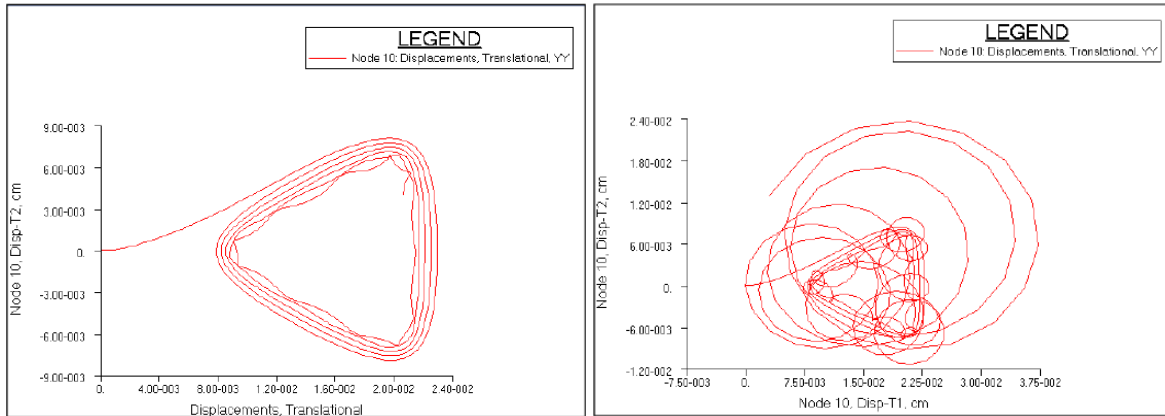
Campbell diyagramıyla birlikte önemli olan bir grafik daha dönme hızına karşı sönümlenme katsayısı çıktılarını gösteren Stabilité Grafikleridir. Bu grafikte bakılan temel şey, sisteme giren enerjinin yeterince sönümlenip sönümlenmediği olacaktır.

Sönümlenme oranı 1'in üzerine çıktığında rotorun stabil olmadığı ve sürekli yükselen bir cevapla karşılaşılacağı bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 5: Stabilite Grafiği Örneği

Transient analizlerde stabil olan ve olmayan yörüngeler grafik olarak çizdirilip incelenebilmektedir. İncelenmek istenen düzlem oluşturulacak grafiklerin x ve y eksenlerine girilerek deplasman sonuçları görülebilir. Aynı zamanda tüm time stepler aynı grafikte gösterilerek sonuçların stabil olup olmadığı gözlemlenebilir. Aşağıdaki görsellerde stabil olan ve stabil olmayan yörüngelerden birer örnek verilmiştir. Stabil olmayan yörüngenin devamlı büyüyen davranışı açık bir şekilde görülebilir.



Şekil 6: Stabil ve Stabil Olmayan Yörünge Örnekleri

Modelde dönme hızları ve dönme eksenleri farklı birden fazla rotor olabilir. Eğer modelde birden fazla rotor bulunmaktaysa, bu rotordan bir tanesi referans rotor olmak zorundadır. Çünkü dönme hızı sadece referans rotora eklenmektedir. Diğer rotordların dönme hızı ise referans rotordun dönme hızının bir katsayısı olarak girilebilir. Örneğin 200 rpm hızda dönen bir rotor modellemek isteniyorsa ve referans rotor 100 rpm hızda dönüyorsa, modellemek istenen rotordun hız kısmına 2 yazılması yeterli olacaktır. Aşağıdaki örnekte bu girdinin nasıl oluşturulabileceği gösterilmiştir.

```

$-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8-----9-----
$RSPINR ROTRID GRIDA GRIDB SPDUNT SPDIT ROTRSEID
$      GR      ALPHAR1 ALPHAR2 WR3R  WR4R  WRHR
RSPINR 40      2       1      RPM   2.0
      0.1
RSPINR 50      4       5      RPM   3.0
      0.1
RSPINR 70     10      12     RPM   1.0
      0.1

$-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8-----9-----
$RGYRO  RID      SYNCFLG REFROTR SPRUNIT SPDLOW SPDHIGH SPEED  ROTRSEID
$      WR3WRL  WR4WRL  WRHWRL
RGYRO  33      ASYNC  70      RPM                    3000.0
      0.07                    0.07

```

Şekil 7: Dönme Hızlarının Referanslanması Örneği

- 70 id numaralı rotor referans rotordur, dönme hızı: 3000 RPM
- 40 id numaralı rotor referans rotor değildir, dönme hızı: $2.0/1.0 \cdot 3000 = 6000$ RPM
- 50 id numaralı rotor referans rotor değildir, dönme hızı: $3.0/1.0 \cdot 3000 = 9000$ RPM

Referanslar

- 1) Nastran – Quick Reference Guide
- 2) Nastran – Rotordynamics User's Guide
- 3) NAS127 – Rotordynamics Analysis using MSC Nastran