

# Romax ile NVH Analizlerine Giriş

HAZIRLAYAN	ONAYLAYAN
Mert Erkuş Mekanik Simülasyon Aday Mühendisi	Eren Morgil Mekanik Simülasyon Mühendisi

Tarih: 07/08/2023

Bu dokümanda NVH analizlerine giriş yapmak için gerekli olan kavramlar tanıtarak, bir dişli kutusu modelinde aktarma hatalarının (transmission error) sonuçları incelenmektedir.

## 1. DIŞLI AKTARMA HATALARININ HESAPLANMASI

Dişli aktarma hataları (transmission error), dişli çiftleri arasında oluşan titreşimleri etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu hataları Romax'ta inceleyebilmek için dişli çiftlerinin detaylı dişli çifti olarak modellenmesi gerekmektedir. Dişli aktarma hataları hesaplanmadan önce statik analiz gerçekleştirilip sistemin düzgün şekilde çalışıp çalışmadığına bakılması önerilmektedir. Statik analiz tamamlandıktan sonra dişli mikro-geometri analizi yapılarak dişli aktarma hataları incelenebilmektedir. Romax'ta dişli aktarma hatalarının hesaplanması için kullanılabilen iki farklı diş direngenliği hesaplama yöntemi vardır.

### 1.1. ISO 6336 MODELİ

Bu modelde aktif profilin başlangıcı (start of active profile (SAP)) ile aktif profilin sonu (end of active profile (EAP)) ortasında yer alan noktada ISO 6336 maksimum toplam mesh direngenliği, aktif profilin başlangıcı ve sonunda ise tek diş maksimum diş direngenliği değeri kullanılır. Bu modelde Hertz elastik modeli kullanılmamaktadır. Direngenlik eğrisi hesaplanmış olan üç empirik değere oturtulan ikinci dereceden bir denklemle oluşturulmaktadır.

### 1.2. SONLU ELEMAN TABANLI DIŞLI VE NON-LINEER KONTAK MODELİ

Bu model temas direngenliğini (contact stiffness) de hesaba katan bir modeldir. Diş deformasyon hesaplarının iyileştirilmesiyle birlikte mesh direngenliği de değişmektedir. ISO 6336 modelinde, diş kalınlıkları arasındaki farklardan kaynaklanabilecek direngenlik farkları hesaba katılmazken, bu modelde mesh direngenliği tek tek hesaplanmış diş direngenliği değerleri kullanılarak belirlenmektedir. Bu nedenle SAP ve EAP arasındaki direngenlik değerlerinde ISO 6336 modeline kıyasla daha büyük farklar oluşması beklenmektedir.

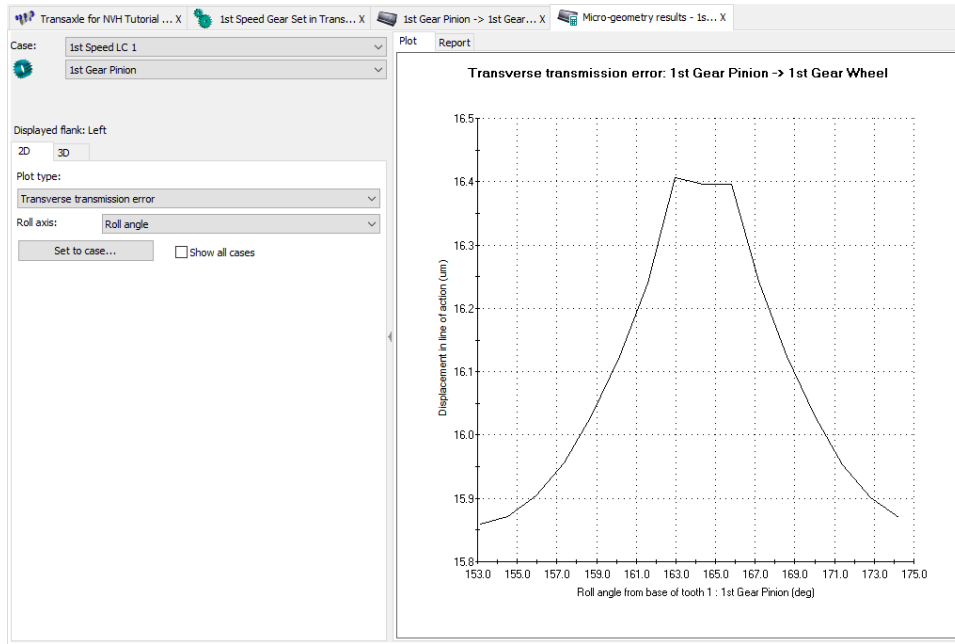
Diş eğilme direngenliği (bending stiffness) sonlu eleman diş ve lineer olmayan temas modelinde dört ayrı bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler:

- **Mindlin–Reissner plaka (plate) teorisi** kullanılarak hesaplanan eğilme (bending),
- **Timoshenko kiriş (beam) Teorisi** kullanılarak hesaplanan basma (compression),
- **Empirik yöntemlerle** hesaplanan kök rotasyonu,
- **Empirik yöntemlerle** hesaplanan kök kayma (root shear).

Diş direngenliği varsayılan ayarlarda SAP ve EAP arasında yedi farklı noktada hesaplanmaktadır. Diş çiftinin mesh direngenliği her bir dişin kombine edilmiş direngenliğinden türetilmektedir. Diş çiftinin direngenliği, bir spline eğrisi kullanılarak belirli yuvarlanma konumlarına interpolate edilmektedir.

## 2. TRANSMISSION ERROR (AKTARMA HATASI) SONUÇLARI

Statik analiz ve mikro-geometri analizi koşturulduktan sonra aktarma hataları görüntülenebilmektedir. Mikro-geometri analizinin yürütülmesinin ardından açılan ekranda çeşitli sonuçlar incelenebilmektedir.



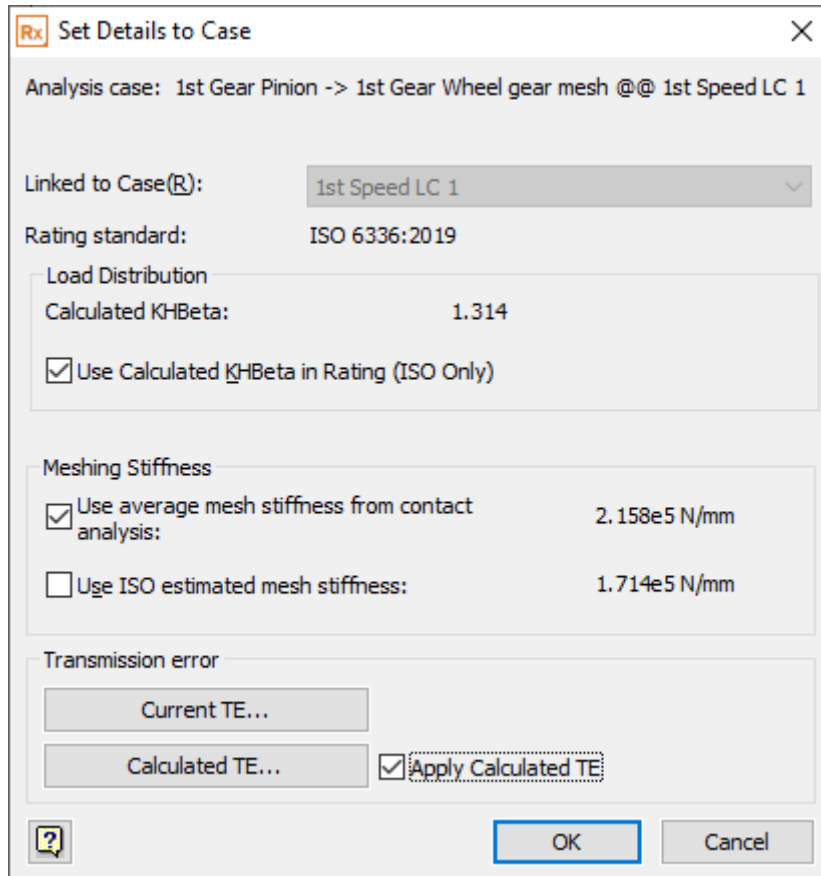
ŞEKİL 1: AKTARMA HATASI SONUÇLARI

- **Transverse Transmission Error:** Temas döngüsü boyunca oluşan aktarma hatasını göstermektedir.
- **Misalignment Transmission Error:** Temas döngüsü boyunca dişli hizasızlığını (misalignment) göstermektedir. Tek bir dişli çifti inceleniyorsa bu değer, mil sapmalarından hesaplandığı ve mil sapmaları temas süresince değişmediği için sabittir.
- **Transverse Transmission Error Tooth Pass Harmonics:** Diş geçiş frekansına bağlı enine düzlemde gerçekleşen aktarma hatalarının FFT harmoniklerini vermektedir.

- **Misalignment Transmission Error Tooth Pass Harmonics:** Hizalama hatası sabit olduğu için bu herhangi bir FFT harmoniği cevabı vermemektedir. Dişli hizalama hataları mil deplasmanlarından hesaplandığı için zamana bağlı olarak değişmemektedir.
- **Transverse Transmission Error Harmonics:** Toplam diş geçişi sayısına bağlı olarak enine düzlemde gerçekleşen aktarma hatalarının FFT harmoniklerini vermektedir.
- **Misalignment Transmission Error Harmonics:** Diş geçişlerinin toplam sayısına bağlı olarak Enine iletim hatasının FFT Harmoniklerini vermektedir.
- **Tooth Transverse Load:** Her diş için temas döngüsü boyunca çapraz yönde oluşan temas yüklerini göstermektedir.
- **Theoretical Contact Ratio:** Temas döngüsü boyunca teorik olarak kontakta olan maksimum yüzey genişliğini vermektedir.

### 3. AKTARMA HATALARININ NVH ANALİZLERİ İÇİN AYARLANMASI

Mikro-geometri analiz sonuçlarının görüntülediği bölümde “Set to case” seçeneğine tıklanarak dişli mesh direngenliğinin temas analizi sonuçlarına göre ayarlanması “Use average mesh stiffness from contact analysis” seçimi yapılarak ve aktarma hatası sonuçları “Apply Calculated TE” seçimi yapılarak seçili yükleme koşulu için ayarlanabilmektedir.



ŞEKİL 2 – DIŞLI MESH DİRENGENLİĞİNİN TEMAS ANALİZİ SONUÇLARINA GÖRE AYARLANMASI

## 4. AKTARMA HATALARININ İLERİ DİŞLİ TEMAS ANALİZİ KULLANILARAK HESAPLANMASI

Bu analiz kullanılarak dişli kutusu aktarma hatalarının yanında planet dişli sistemlerindeki aktarma hataları da hesaplanabilmektedir. Dişli kutusu aktarma hatası (Gearbox Transmission Error (GBTE)), diş teması boyunca, giriş milinden çıkış miline kadar tüm millerin sapmalarındaki değişimleri hesaba katarak hesaplanmaktadır.

### 4.1. DİŞLİ KUTUSU AKTARMA HATASI (GBTE)

Dişli aktarma hataları muhafaza, rulman ve millerin direngenliğine bağlı olarak değişmektedir. Dişli kutusu aktarma hatasının temel sebepleri;

- Dişli temas oranının yuvarlanma açısıyla (roll angle) değişim göstermesi,
- Hizalama hataları (mesh misalignment),
- Dişli mesh direngenliğinin temasın gerçekleştiği yere bağlı olarak değişmesi,
- Dişli yanağının mikro-geometrisi olarak sayılabilir.

Bir dişli çiftindeki aktarma hatasının doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için sistemin belirli kriterleri karşılaması gerekmektedir. Bu kriterler; sabit tork, yüz genişliği boyunca sabit yükleme noktası ve sabit hizalama hatası olarak sayılabilir. Ancak sayılan bu kriterler planet dişli sistemlerinde gezegenlerin tork paylaşımlarının her diş geçişinde değişmesinden dolayı geçerli olmamaktadır. Planet taşıyıcının direngenliği de dişli konumlarına bağlı olarak değişim göstereceğinden bu dişli sistemleri için GBTE analizi kullanılmalıdır. GBTE analizleri bu koşulların sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmeden doğru sonuçlar alınabilmesini sağlamaktadır.

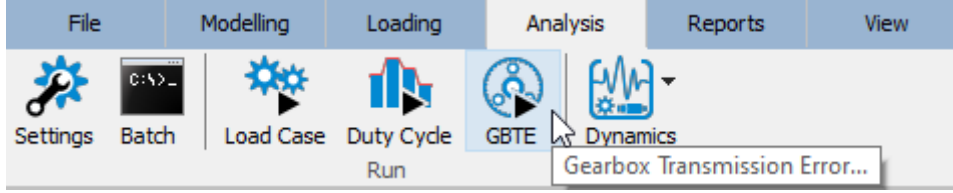
Romax'ta bu analizin kullanılabilmesi için dişlilerin detaylı dişli çiftleri (detailed gears) olarak modellenmiş olması gerekmektedir. Konsept dişli çiftleri (concept gears) sistemin içerisinde bulunabilir, ancak bu dişliler için aktarma hataları hesaplanmamaktadır. Sistemin dinamik analizi yapılarak dişli aktarma hatası sonuçlarının tahriklerin doğru fazlarda alınarak NVH analizlerinde kullanılması da sağlanabilmektedir. İzole dişli çiftleri için hesaplanan aktarma hataları ve GBTE sonuçları arasındaki temel farklılıklar aşağıda yer alan tabloda açıklanmıştır:

TABLO 1: TEK DİŞLİ ÇİFTİ İÇİN HESAPLANAN AKTARMA HATALARI VE GBTE ARASINDAKİ FARKLAR

	Tek dişli çifti iletim hatası	GBTE - Dişli takımları ve uydu dişliler
<b>Diğer dişli meshlerinin etkisi</b>	Etkisi yoktur. Bu iletim hatası analizi izole olarak kabul edilebilir.	Dişli meshleri birbirini yüksek ölçüde etkiler.
<b>Dişli mesh'inden aktarılan tork</b>	Sabittir (Güç aktarımının sadece bu dişli mesh'inden aktarıldığı yükleme koşullarında).	Zamana bağlıdır. Taşıyıcı döndükçe her dişli meshinden aktarılan tork değişebilir (Uydu dişliler üzerindeki kuvvetler değişebilir veya eşit olmayan şekilde dağılır).
<b>Hizalama hatası</b>	Sabit kabul edilir.	Zamana bağlıdır, zamana bağlı torka ve taşıyıcının dönüşüne bağlı olarak değişir.
<b>Mesh moment direngenliği</b>	Dahil edilmez, hizalama hatası sabit kabul edildiği için bir tahrik oluşmaz.	Lead düzeltmelerine bağlı olarak mesh moment düzeltmeleri hizalama hatasının hesaplanmasına dahil edilir. Hizalama hatası bir tahrik kaynağıdır.

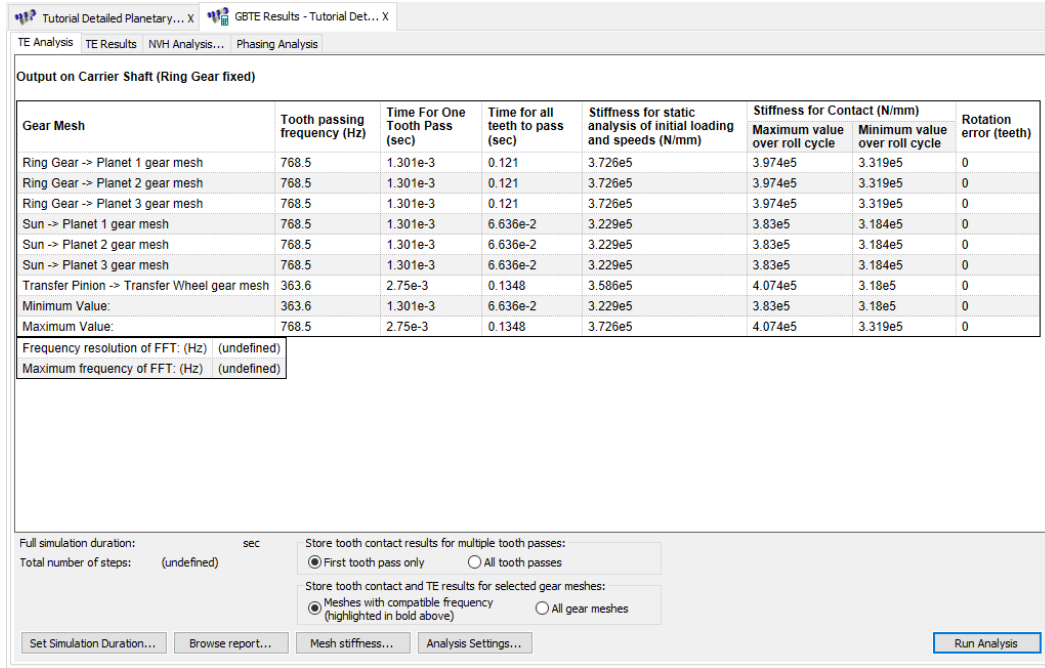
## 4.2. DİŞLİ KUTUSU AKTARMA HATASININ (GBTE) HESAPLANMASI

Bu kısımda GBTE aracının ve GBTE hesaplamasında kullanılan ayarlar açıklanmıştır. Statik analiz seçili yüklemeye koşulu için gerçekleştirildikten sonra “Analysis” sekmesi altında “GBTE” ye tıklanarak dişli kutusu aktarma hataları incelenebilmektedir.



ŞEKİL 3 – GBTE ANALİZİNİN KOŞTURULMASI

Açılan “GBTE Results” ekranından GBTE sonuçlarına erişilebilmektedir. Sonuçlar, açılan pencerede “TE Analysis”, “TE Results”, “NVH Analysis” ve “Phasing Analysis” sekmelerinden incelenebilmektedir. Varsayılan olarak “TE Analysis” sekmesi açılmakta ve bu sekmeden planet dişli sisteminin mesh temas analizi sonuçları görüntülenebilmektedir.



Gear Mesh	Tooth passing frequency (Hz)	Time For One Tooth Pass (sec)	Time for all teeth to pass (sec)	Stiffness for static analysis of initial loading and speeds (N/mm)	Stiffness for Contact (N/mm)		Rotation error (teeth)
					Maximum value over roll cycle	Minimum value over roll cycle	
Ring Gear -> Planet 1 gear mesh	768.5	1.301e-3	0.121	3.726e5	3.974e5	3.319e5	0
Ring Gear -> Planet 2 gear mesh	768.5	1.301e-3	0.121	3.726e5	3.974e5	3.319e5	0
Ring Gear -> Planet 3 gear mesh	768.5	1.301e-3	0.121	3.726e5	3.974e5	3.319e5	0
Sun -> Planet 1 gear mesh	768.5	1.301e-3	6.636e-2	3.229e5	3.83e5	3.184e5	0
Sun -> Planet 2 gear mesh	768.5	1.301e-3	6.636e-2	3.229e5	3.83e5	3.184e5	0
Sun -> Planet 3 gear mesh	768.5	1.301e-3	6.636e-2	3.229e5	3.83e5	3.184e5	0
Transfer Pinion -> Transfer Wheel gear mesh	363.6	2.75e-3	0.1348	3.586e5	4.074e5	3.18e5	0
Minimum Value:	363.6	1.301e-3	6.636e-2	3.229e5	3.83e5	3.18e5	0
Maximum Value:	768.5	2.75e-3	0.1348	3.726e5	4.074e5	3.319e5	0

Frequency resolution of FFT: (Hz) (undefined)  
Maximum frequency of FFT: (Hz) (undefined)

Full simulation duration: sec  
Total number of steps: (undefined)

Store tooth contact results for multiple tooth passes:  
 First tooth pass only  All tooth passes

Store tooth contact and TE results for selected gear meshes:  
 Meshes with compatible frequency (highlighted in bold above)  All gear meshes

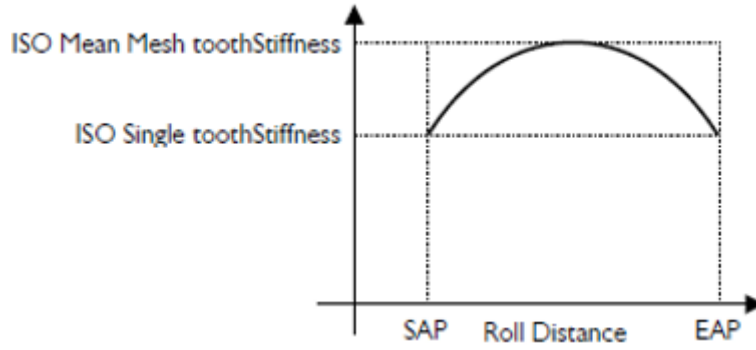
Buttons: Set Simulation Duration..., Browse report..., Mesh stiffness..., Analysis Settings..., Run Analysis

ŞEKİL 4 – GBTE RESULTS PENCERESİ

Açılan sekmede görüntülenen tablodaki sonuçların açıklaması aşağıdaki şekildedir;

- **Gear Mesh:** Bu sütun, modelde yer alan tüm detaylı dişli meshlerini göstermektedir.
- **Tooth Passing Frequency (TPF) (Hz):** Bu sütun, shaft dönme hızı ve dişlinin diş sayısına bağlı olarak diş geçiş frekansını vermektedir.
- **Time for One Tooth Pass (sec):** Dişli meshinde yer alan tek bir diş için geçiş süresini hesaplamaktadır.
- **Time for All Teeth to Pass (sec):** Dişli meshinden tüm dişlerin geçmesi için gereken süreyi hesaplamaktadır.

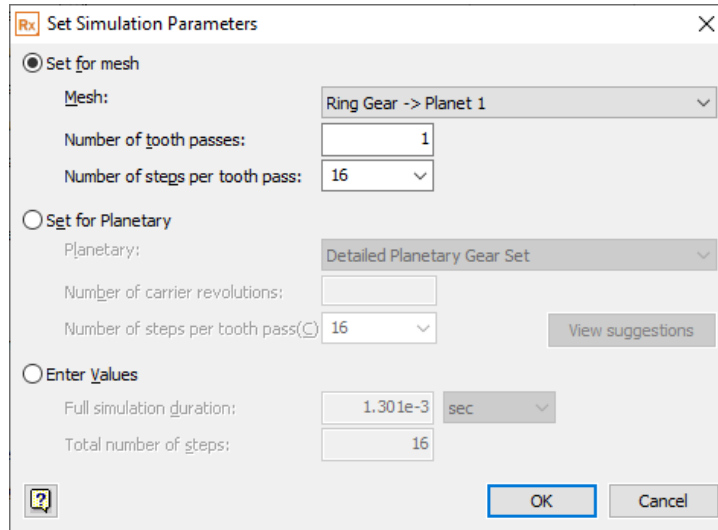
- **Stiffness for static analysis of initial loading and speeds (N/mm):** Efektif yüz genişliğine bağlı olarak hesaplanan mesh direngenliği değeridir. Mikro-geometri analizi yapılmadığı takdirde tüm iterasyonlar için bu değer kullanılmaktadır.
- **Stiffness for Contact (N/mm):** ISO 6336 standardının yaklaşımıyla ortalama mesh direngenliği (mean mesh stiffness) ve tek diş direngenliğini (single tooth stiffness) verilen tork seviyesine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Romax, ISO ortalama mesh direngenlik değerini yuvarlanma aralığının orta noktasında ve ISO tek diş direngenliği değerini yuvarlanma aralığının kök ve uç noktalarına uygulamaktadır. Romax, parabolik bir fonksiyon kullanmaktadır.



ŞEKİL 5 – ROMAX'IN STIFFNESS FOR CONTACT YAKLAŞIMI

- **Rotation Error (Teeth):** Dişlerinin doğru bir şekilde birbirine geçmesi için gereken ekstra dönme miktarı olarak tanımlanmaktadır. Eğer dişlerin pozisyonu, dişlerin tam olarak birbirine geçebilmesi için doğru ayarlanmadıysa bir dönüş ofseti eklenerek, mesh yüklemesi üzerindeki etkiler dahil edilebilmektedir. Gereken ofset, dişlerin açıl aralığının %5'inden fazla olduğunda bir hata oluşarak analiz sonlandırılmaktadır.

GBTE Results penceresinde görülen “Set Simulation Duration” butonuna tıklanarak açılan pencerede ise simülasyon parametreleri düzenlenebilmektedir.

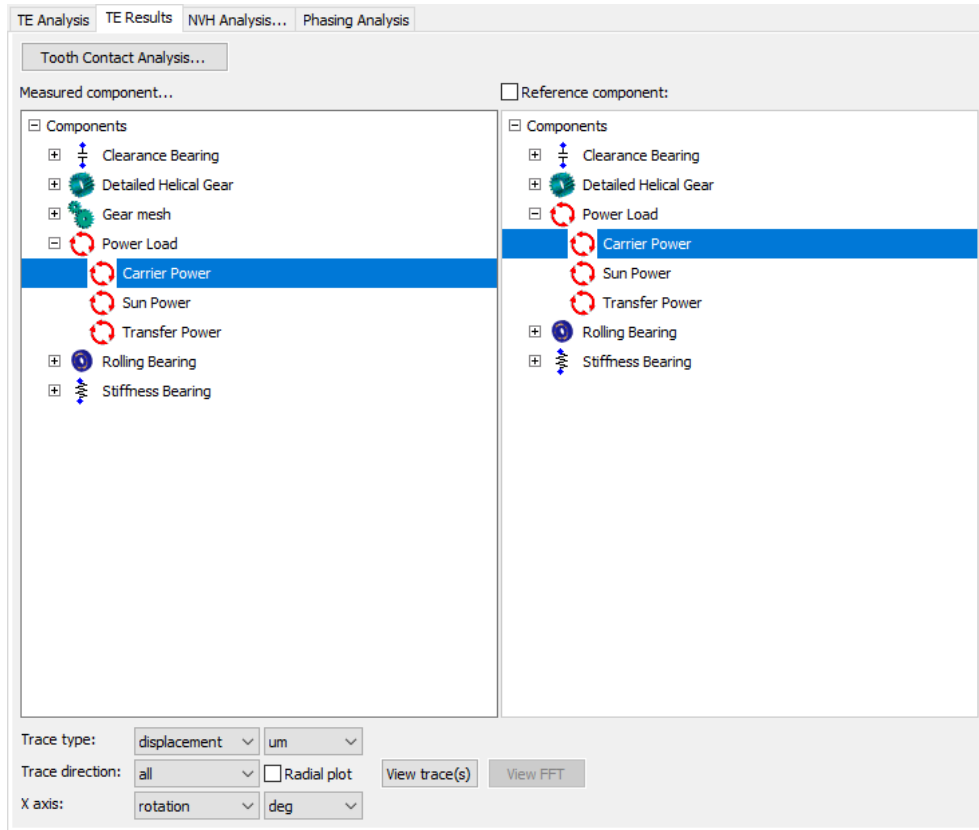


ŞEKİL 6 – SET SIMULATION PARAMETERS PENCERESİ

Aşağıda, GBTE Results penceresinde görülen diğer seçenekler açıklanmıştır:

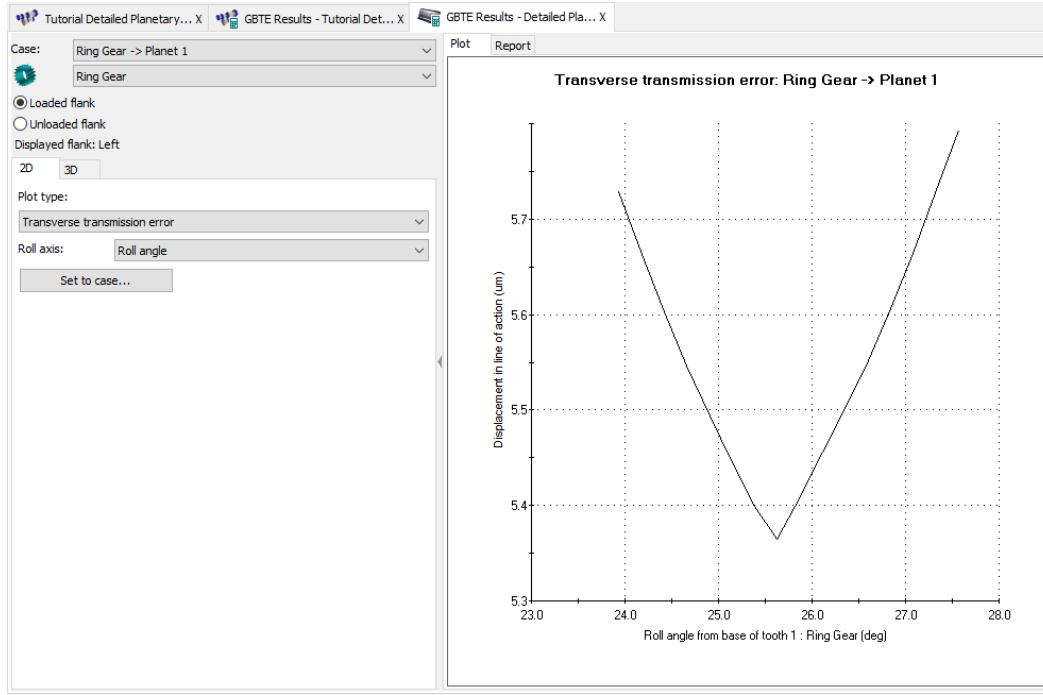
- **Mesh Stiffness:** Mesh dirençlilik profilini görüntülemeye ve üzerinde değişiklik yapabilmeyi sağlayan pencereyi açmaktadır.
- **Analysis Settings:** Mevcut statik analiz tercihlerini görüntülemeye ve düzenlemeye yarayan pencereyi açmaktadır.
- **Run Analysis:** Tanımlanan parametreleri kullanarak mevcut yük durumundaki tüm dişli kutusu için aktarma hatası analizini çalıştırmaktadır. Bu hesaplama dişli kutusunun boyutuna bağlı olarak biraz zaman alabilmektedir. Analiz tamamlanmadan iptal edilmesi durumunda ise hesaplamalar durur ancak hesabı tamamlanmış adımlar için sonuçlar korunmaktadır.

GBTE Results penceresinin “TE Results” sekmesinde ise aktarma hatası sonuçları seçilen bileşen (measured component) için belirlenen bir referansa (reference component) bağlı olarak görüntülenebilmektedir.



ŞEKİL 7 – TE RESULTS SEKMESİ

Açılan pencerede “Tooth Contact Analysis” butonuna tıklanarak mikro-geometri analiz sonuçları penceresi açılarak sonuçlar incelenebilir.



ŞEKİL 8 – MİKRO-GEOMETRİ ANALİZ SONUÇLARI PENCERESİ

Bir diğer sekme olan “NVH Analysis” sekmesinde ise hesaplanmış olan aktarma hatası ve dirençlik değerlerinin yapılacak analize uygulanması sağlanabilir ve NVH Analizi gerçekleştirilebilir.

Gear Mesh	ISO Mean Stiffness (N/mm)	Calculated Mesh Stiffness			Transmission error					
		Linear in line of action (N/mm)	Tilt normal to plane of action (Nmm/rad)	Cross term (N)	First Harmonic		Second Harmonic		Third Harmonic	
					Amplitude (um)	Phase: (deg)	Amplitude (um)	Phase: (deg)	Amplitude (um)	Phase: (deg)
Ring Gear -> Planet 1	(3.726e5,0)(0,0)	4.835e5	2.687e7	9.118e4	0.1764	23.664	1.326e-2	32.850	2.218e-2	70.074
Ring Gear -> Planet 2	(3.726e5,0)(0,0)	4.835e5	2.687e7	9.12e4	0.1764	23.664	1.326e-2	32.847	2.219e-2	70.073
Ring Gear -> Planet 3	(3.726e5,0)(0,0)	4.835e5	2.687e7	9.119e4	0.1764	23.664	1.326e-2	32.850	2.218e-2	70.074
Sun -> Planet 1	(3.229e5,0)(0,0)	4.251e5	2.364e7	-7.551e4	0.197	170.932	3.379e-2	-85.261	1.36e-2	135.985
Sun -> Planet 2	(3.229e5,0)(0,0)	4.251e5	2.364e7	-7.55e4	0.197	170.932	3.379e-2	-85.259	1.36e-2	135.984
Sun -> Planet 3	(3.229e5,0)(0,0)	4.251e5	2.364e7	-7.549e4	0.1969	170.932	3.379e-2	-85.258	1.36e-2	135.982
Transfer Pinion -> Transfer Wheel	(3.586e5,0)(0,0)	Not calculated	Not calculated	Not calculated	Not calculated					

Gear Mesh	Stiffness			Transmission error					
	Linear in line of action (N/mm)	Tilt normal to plane of action (Nmm/rad)	Cross term (N)	First Harmonic		Second Harmonic		Third Harmonic	
				Amplitude (um)	Phase: (deg)	Amplitude (um)	Phase: (deg)	Amplitude (um)	Phase: (deg)
Ring Gear -> Planet 1	4.855e5	2.699e7	9.241e4	0.1761	23.670	1.323e-2	32.876	2.215e-2	70.091
Ring Gear -> Planet 2	4.855e5	2.699e7	9.244e4	0.1762	23.670	1.323e-2	32.863	2.216e-2	70.081
Ring Gear -> Planet 3	4.855e5	2.699e7	9.242e4	0.1762	23.670	1.323e-2	32.863	2.215e-2	70.078
Sun -> Planet 1	4.268e5	2.373e7	-7.65e4	0.1967	170.929	3.376e-2	-85.309	1.358e-2	136.004

Set results from TE analysis:

Transmission error

Mesh stiffness...

Calculated

ISO

Select gear meshes:

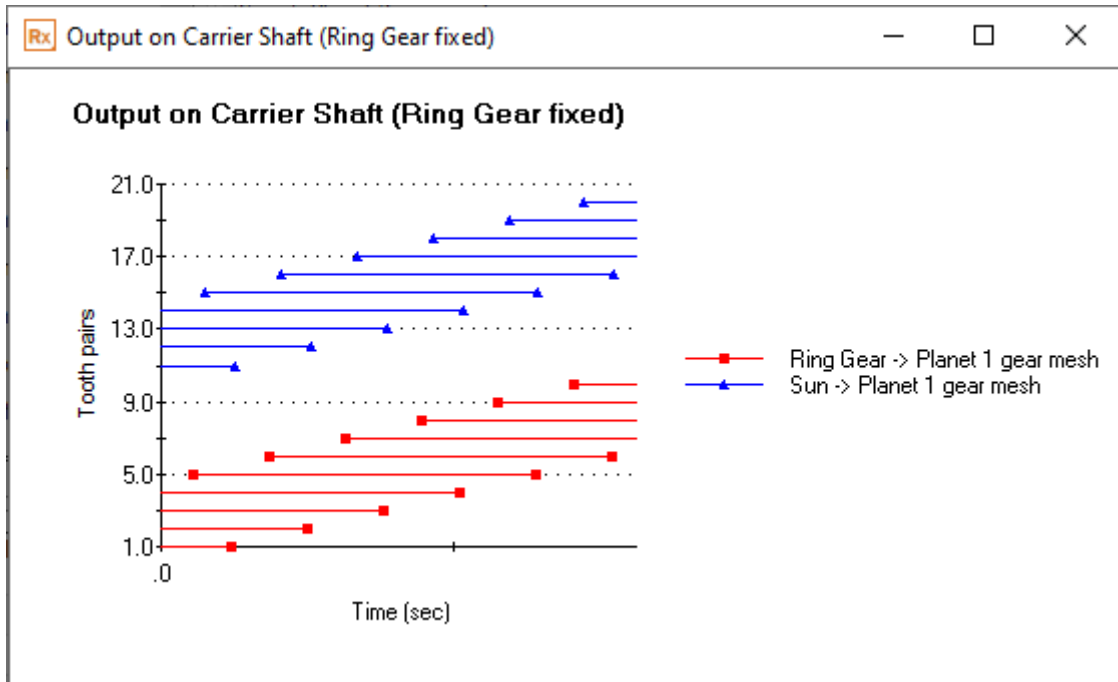
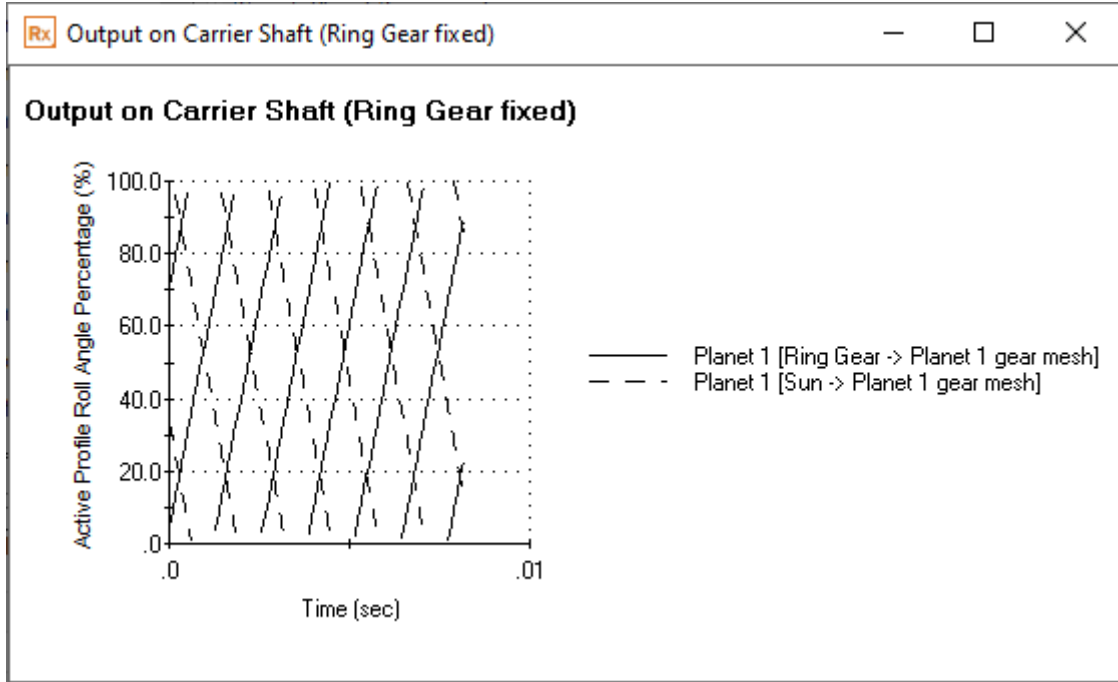
- Ring Gear -> Planet 1 gear mesh
- Ring Gear -> Planet 2 gear mesh
- Ring Gear -> Planet 3 gear mesh
- Sun -> Planet 1 gear mesh
- Sun -> Planet 2 gear mesh

Buttons: Set, Remove, Select All, Browse report..., Gear Mesh Attributes, NVH Analysis...

ŞEKİL 9 – NVH ANALYSIS SEKMESİ



“Phasing Analysis” sekmesinde ise diğli meshlerinin fazları grntlenebilmekte ve karşılaştırılabilmektedir.



ŐEKIL 10 – RNEK PHASING ANALYSIS SONUCU

## REFERANS

- NVH1: Transmission Error Calculations