

ROMAX EVOLVE İLE ELEKTRİKLİ MAKİNALARIN NVH ANALİZLERİNE GİRİŞ

HAZIRLAYAN	ONAYLAYAN
Umut Tektürk Lider Mekanik Simülasyon Mühendisi	Önder Türkan Satış Öncesi Teknik Müdürü

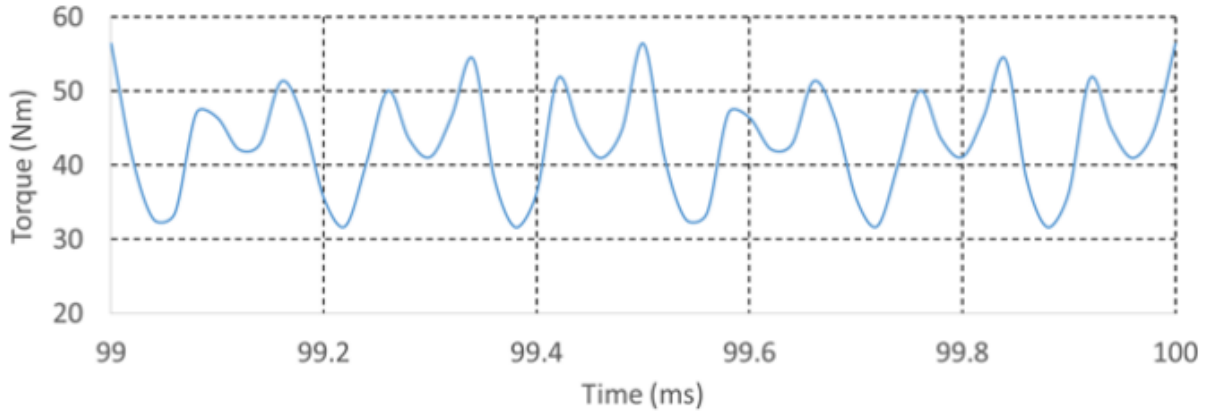
Tarih: 21/07/2022

Bu çalışma kapsamında elektrikli motor (EM) içeren bir sistemin Romax Evolve modülü kullanılarak modellenmesi ve NVH (Gürültü-Titreşim-Sertlik) analizlerinin gerçekleştirilmesi ele alınmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde EM tahrik kaynaklarından bahsedilecek, ardından bu kaynakların Romax modeline entegrasyonu üzerinde durulacaktır. İkinci bölümde ise NVH analizleri gerçekleştirilecek ve sonuçlar sunulacaktır.

1) Elektrikli Makina Tahrik Kaynakları

A. Tork Dalgalanması (Torque Ripple)

Elektrikli makinalarda rotor, stator kanallarını(slots) geçerek dönerken, aktarılan tork zamanla Şekil 1'deki gibi dalgalanır. Bunun bir sonucu olarak rotor ve stator üzerine tüm aktarım sistemi(drivetrain) ve muhafazada(housing) titreşim üreten eşit ve zıt yönlü bir tork uygulanır. Bu durum muhafaza yüzeyinden gürültü yayılmasına sebep olur ve titreşimin muhafaza bağlantıları aracılığıyla sistem gövdesine iletilmesine sebep olur.



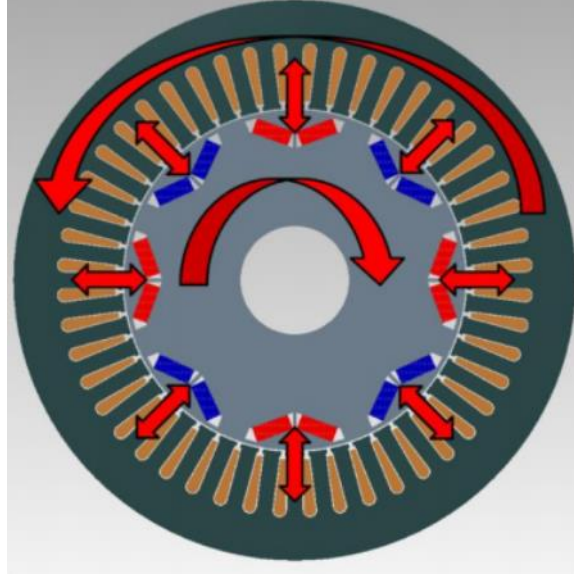
ŞEKİL 1:TORK DALGALANMASI ÖRNEK GÖRSEL

B. Dönen Radyal Kuvvetler

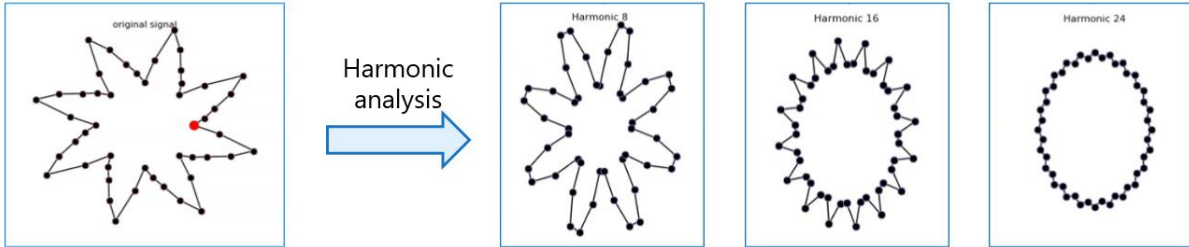
Elektrikli motorların dönmesi nedeniyle oluşan bir diğer dinamik etki de rotor ve stator arasında oluşan radyal kuvvetlerdir. Eşmerkezli bir rotor üzerindeki kuvvetlerin birbirini dengelediği kabul

edilse de stator üzerindeki kuvvetler muhafazanın titreşmesine neden olur. Bu radyal kuvvetler, karmaşık-dönen kuvvet şekilleri oluşturur ve stator dişlerine etki eder.

Tork dalgalanması ve radyal kuvvet tahrikleri, elektromanyetik sonlu eleman (SE) yazılımları kullanılarak elde edilebilmekte ve Romax yazılımına entegre edilebilmektedir. Karmaşık stator-radyal kuvvet şekilleri Romax içerisinde harmoniklerine ayrılarak "Titreşim Analizi" ve "Akustik Analiz" araçlarıyla tahrik olarak uygulanabilmektedir.



ŞEKİL 2: ROTOR VE STATOR ARASINDAKİ RADYAL KUVVETLER VE TORK DALGANMASI



ŞEKİL 3: KARMAŞIK RADYAL KUVVET ŞEKİLLERİNİN FOURIER ANALİZİ İLE HARMONİKLERE AYRILMASI

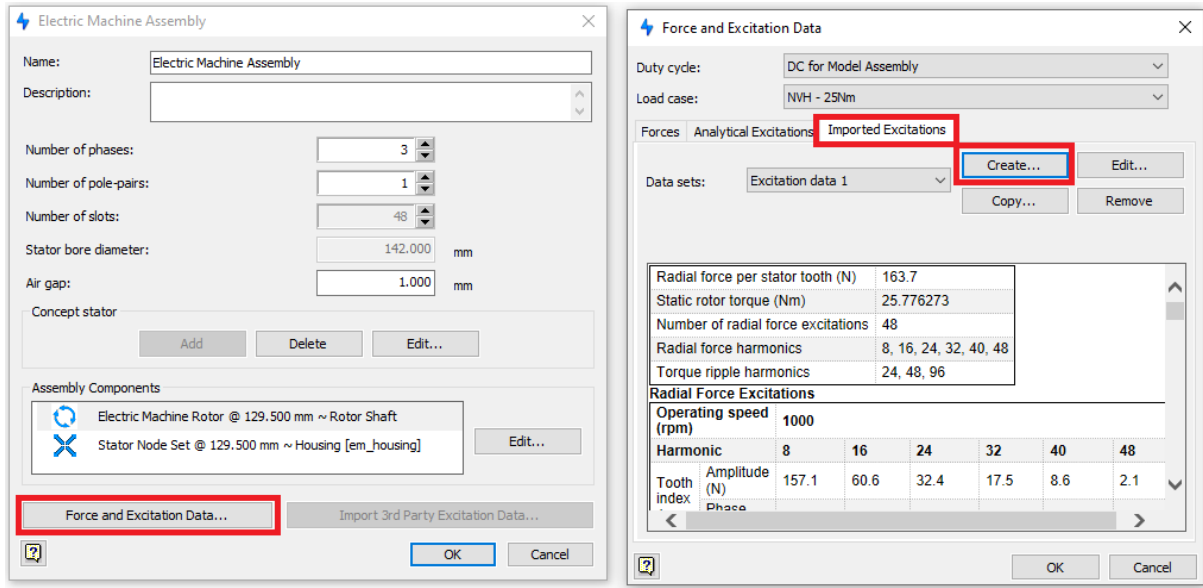
C. Mekanik Dengesizlik

Dengelenmemiş bir mil, dönme hızının karesiyle orantılı olarak mil üzerinde dönen bir radyal kuvvet uygular. Bu ilişki, elektrikli makinelerin çok yüksek hızlarda çalışabildiği gerçeği ile ele alındığında, bu kuvvetler tüm sistemin dinamik davranışı açısından önemli olmaktadır. Bu nedenle, mekanik dengesizlik modellemeye dahil edilir ve "Titreşim Analizinde" bir tahrik kaynağı olarak uygulanabilir.

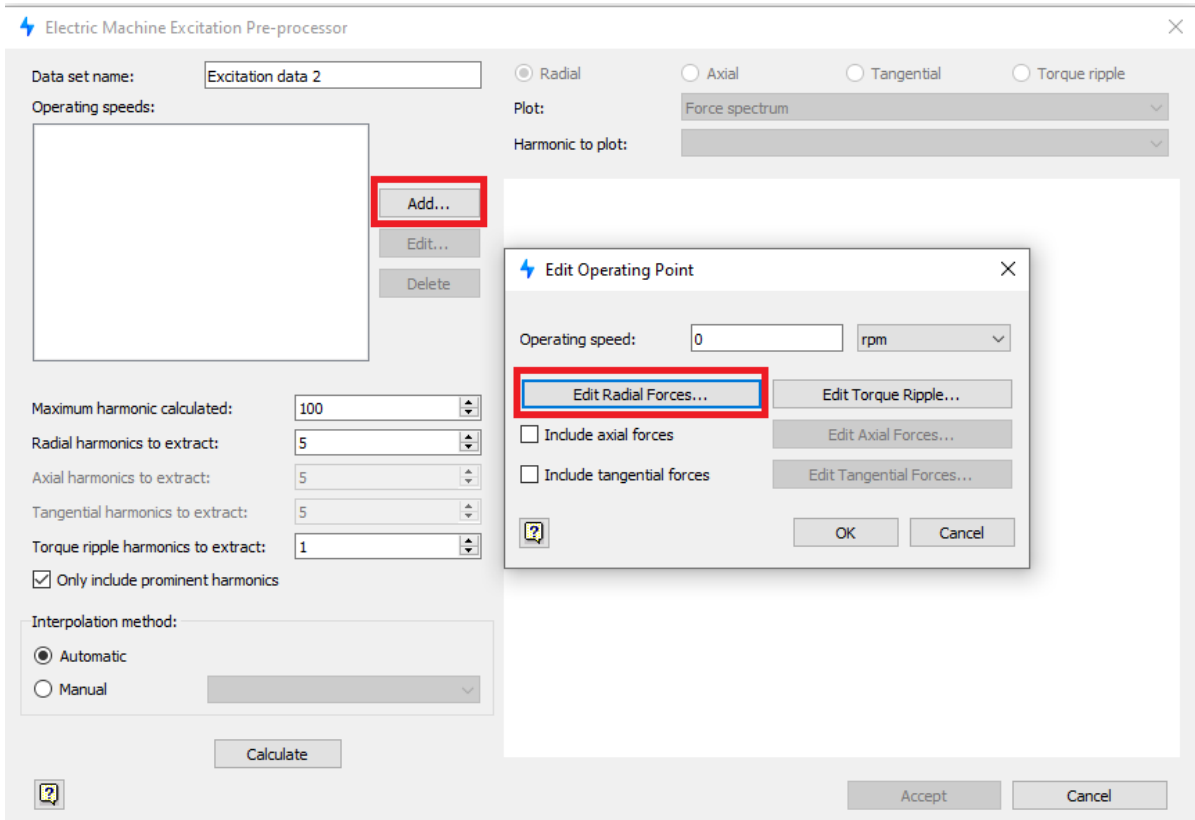
2) Romax Evolve Arayüzünde Tahrik Mekanizması Tanımlamaları

Bu çalışma kapsamında, tipik bir "IPM permanent-magnet" motor tasarlanmış ve 3. parti bir elektromanyetik sonlu eleman yazılımı yardımıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tahrik verileri (dış radyal kuvvetleri ve tork dalgalanması) 25 Nm tork değerinde dört farklı hız için elde edilmiştir.

Tahrik verileri .csv formatında elde edilmiş olup, Romax içerisine aktarılmıştır. Romax içerisinde tahrik tanımlama adımları Şekil 4 ve Şekil 5 de gösterilmiştir.



ŞEKİL 4: ROMAX TAHİRİK TANIMLAMA ADIMLARI 1



ŞEKİL 5: ROMAX TAHİRİK TANIMLAMA ADIMLARI 2

Ön işlemcide kullanılan radyal kuvvet tahrik verisi Şekil 6'da verilmiştir.

⚡ Edit Radial Forces (Newtons)

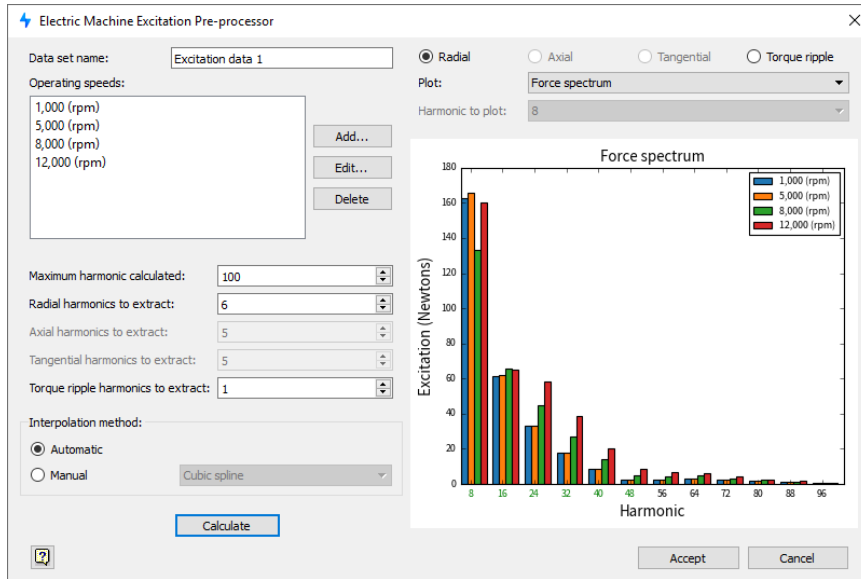
Time (Sec)	Stator tooth 1	Stator tooth 2	Stator tooth 3	Stator tooth 4	Stator tooth 5	Stator tooth 6	Stator tooth 7	Stator tooth 8
0	243.581	139.212	245.572	74.3887	379.256	43.2794	243.581	139.212
0.000166667	302.885	125.389	228.221	69.5905	363.43	40.4014	302.885	125.389
0.000333333	349.546	114.386	211.923	66.8712	349.06	43.2962	349.546	114.386
0.0005	384.773	106.229	194.984	66.0936	336.813	44.8748	384.773	106.229
0.000666667	405.306	100.089	180.394	65.7273	322.859	48.1174	405.306	100.089
0.000833333	404.897	94.2835	166.657	63.2581	304.8	71.4184	404.897	94.2835
0.001	393.299	86.9881	152.827	54.9792	285.916	131.13	393.299	86.9881
0.00116667	375.731	79.1335	139.475	45.9661	266.528	209.524	375.731	79.1335
0.00133333	358.46	72.9483	125.871	40.8995	248.073	277.907	358.46	72.9483
0.0015	342.458	68.784	113.86	42.5312	231.674	331.16	342.458	68.784
0.00166667	328.716	66.7841	104.992	44.7332	213.897	372.357	328.716	66.7841
0.00183333	316.596	66.337	98.5572	46.2007	197.818	402.237	316.596	66.337
0.002	300.355	65.2871	93.6062	58.7379	183.825	412.575	300.355	65.2871

Number of time steps per revolution: 360

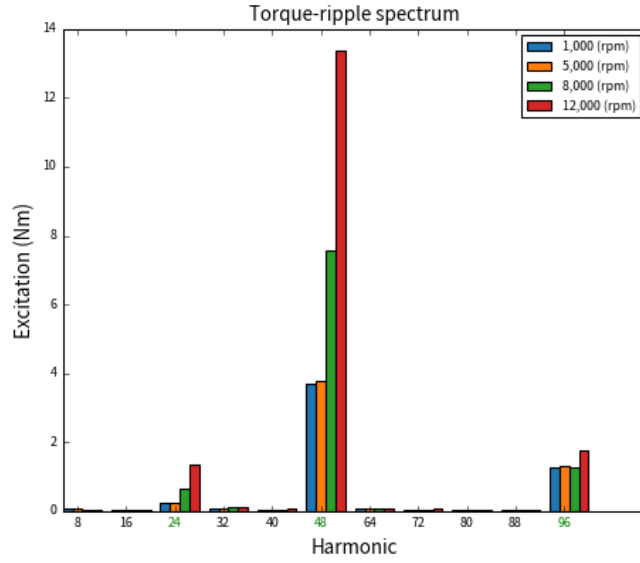
Import CSV Export CSV OK Cancel

ŞEKİL 5: ÖN-İŞLEMCI İÇERİSİNDE KULLANILAN RADYAL KUVVET VERİLERİ

Çalışma kapsamında kullanılan kuvvet ve tork dalgalanması spektrumları Şekil 7 ve Şekil 8’de verilmiştir. Kuvvet spektrumu temsili için 6 harmonik kullanılırken, tork dalgalanması spektrumu temsili için 3 harmonik kullanılmıştır.

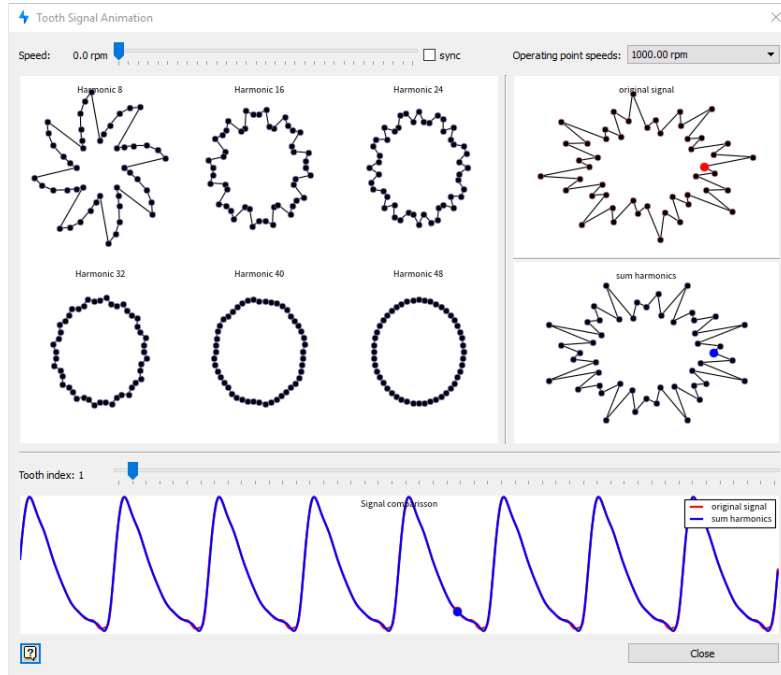


ŞEKİL 6: RADYAL KUVVET HARMONİKLERİ



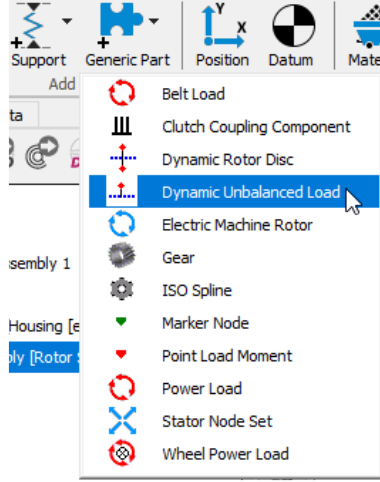
ŞEKİL 7: TORK DALGANMASI HARMONİKLERİ

Diş kuvvet sinyallerinin orjinal sinyallerle olan ilişkisi Şekil 9’da gösterilmiştir. Görselden de anlaşılacağı gibi orjinal sinyal seçili harmoniklerle temsil edilebilmektedir.



ŞEKİL 8: DIŞ KUVVET SİNYAL ANİMASYONU PENCERESİ

Elektrik motorları göreceli olarak yüksek hızlarda dönmektedir ve bu durum üretim toleransları nedeniyle dengelenmemiş kütlelerin sisteme etkisini artırmaktadır. Bu etkiyi simüle etmek için, bu çalışma adımımda girdi için kullanılan mile dengelenmemiş dinamik yük eklemesi yapılarak (Şekil 10) tahrik kaynağı oluşturulmuştur. Mekanik dengesizlik için kullanılan parametreler Tablo 1’de verilmiştir.



ŞEKİL 9: DENGELENMEMİŞ DİNAMİK YÜK EKLENMESİ

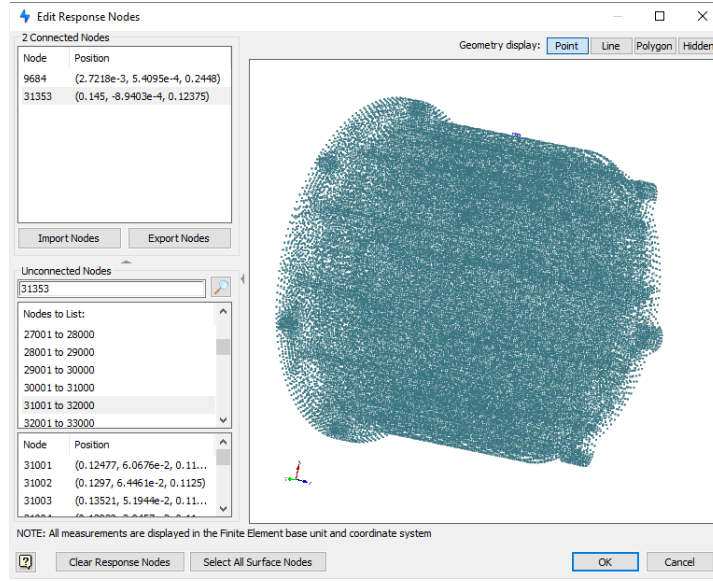
TABLO 1: MEKANİK DENGESİZLİK PARAMETRELERİ

Mekanik Dengesizlik	
Özellik	Değer
Unbalance definition:	By angle, eccentricity and mass
Angle of unbalance:	0 deg
Off centre distance from z-axis:	ISO 1940-1:2003(E)
Balance quality grade:	G 6.3
Max. service speed:	12,000 rpm
Unbalance mass:	16.26 kg

ISO 1940-1, rotorların mekanik dengesizlikleri için kullanılan yaygın bir uluslararası standarttır. Bu standart dönen makinaların üreticisi, kullanıcısı ve/veya geliştiricisi arasında bir ilişki kurmaya olanak sağlamaktadır. Mekanik dengesizliği Tablo 1'deki gibi tanımlayarak rotorun maksimum izin verilebilir dinamik dengesizlik kalite sınıfı G 6.3, maksimum çalışma hızı 12000 rpm ve kütlesi 16.26 kg olarak belirtilmiştir.

3) Tepki Düğüm Noktalarının Tanımlanması

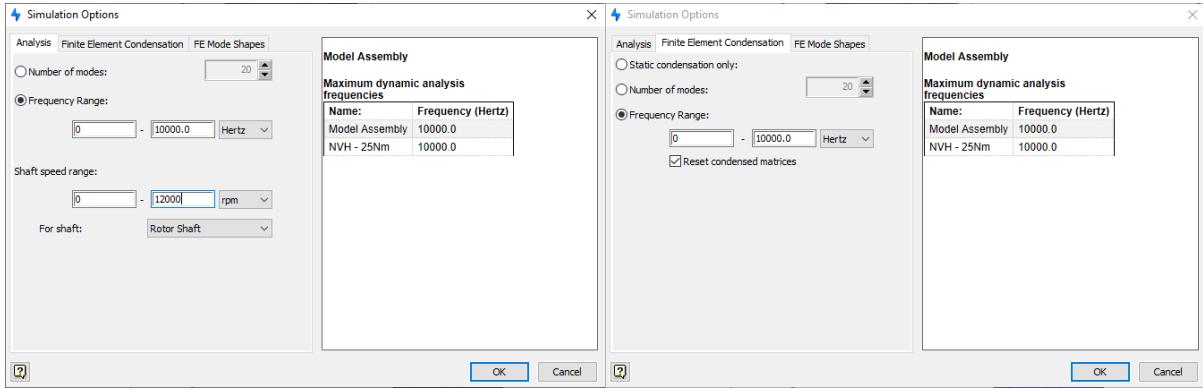
Tepki düğüm noktaları muhafaza sonlu eleman ağı üzerinde tanımlanabilmekte ve sistemin NVH cevabı bu noktalar aracılığıyla incelenebilmektedir. Motor gövdesi üzerinde bulunan 9684 (muhafaza gövdesi üzerinde) ve 31353 (motor kapağı üzerinde) numaralı düğüm noktaları, tepki noktaları olarak seçilmiştir. Bu düğüm noktaları, tipik birer ivme senrörü olarak kullanılmış ve sistemin NVH performansının değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Şekil 11 Romax'ta tepki düğüm noktalarının tanımlanmasını göstermektedir.



ŞEKİL 10: TEPKİ DÜĞÜM NOKTASI DÜZENLEME PENCERESİ

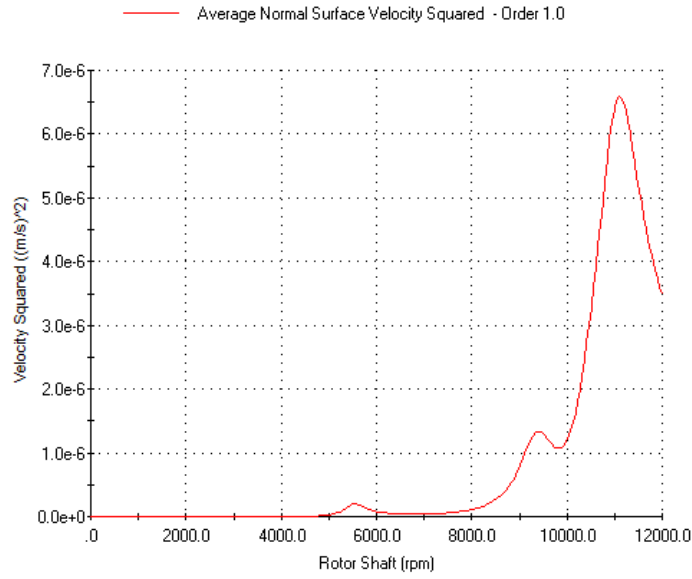
4) NVH Analizleri

Bu çalışma kapsamında NVH analizlerinin koşturulması için SE modeline 10000 Hz bandında dinamik model indirilmesi (dynamic condensation) uygulanmıştır. Analizlerde kullanılan dinamik simülasyon ayarları Şekil 12'de gösterilmiştir.



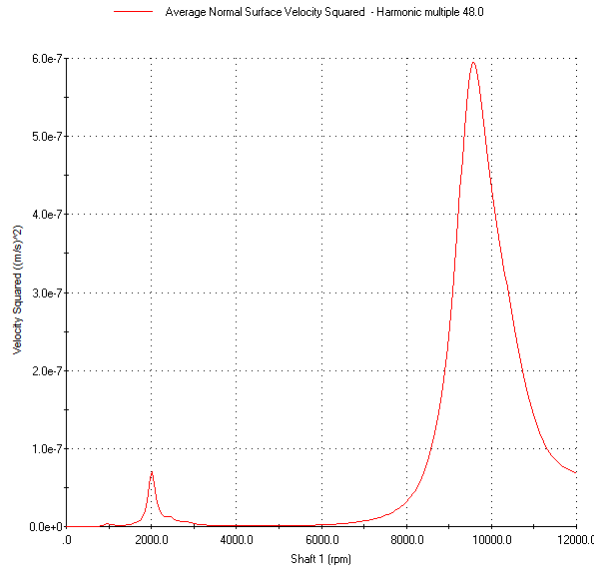
ŞEKİL 11: DİNAMİK SİMÜLASYON AYARLARI

Birinci derece bir yaklaşımda, havada oluşan-yayılan gürültü (airborne noise) MS Vel. ile orantılıdır. Bu yüzden MS Vel. sistemin NVH performansının değerlendirilmesinde kullanılabilir. Mekanik dengesizlik için motor MS Vel cevabı sonuçları Şekil 13'de verilmiştir. Grafikte mil hızı ile beraber tepkinin arttığı görülmektedir. Mekanik dengesizlik kuvvetinin rotor hızının karesiyle orantılı artması nedeniyle bu durum beklenmektedir.



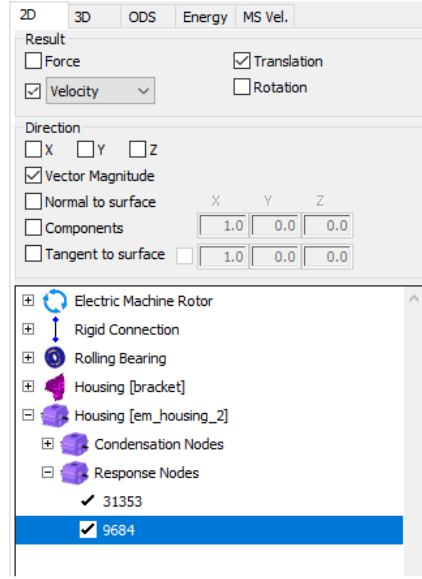
ŞEKİL 12: MEKANİK DENGESİZLİK İÇİN MOTOR MS VEL CEVABI

Çalışmanın bu kısmında elektrikli makina tahrikleri üzerinde durulmuştur. Romax, aynı orderlar için tork dalgalanması ve radyal stator kuvvetlerini aynı anda değerlendirme olanağı sunmaktadır. 48. Harmonik dominant tork dalgalanması ve 0-lobe radyal kuvvet şekli taşıması nedeniyle burada değerlendirmeye alınmıştır. İlgili sonuç Şekil 14’de gösterilmiştir. Grafikte 9550 rpm de büyük tepe, 2000 rpm de küçük tepe gözlemlenmektedir.



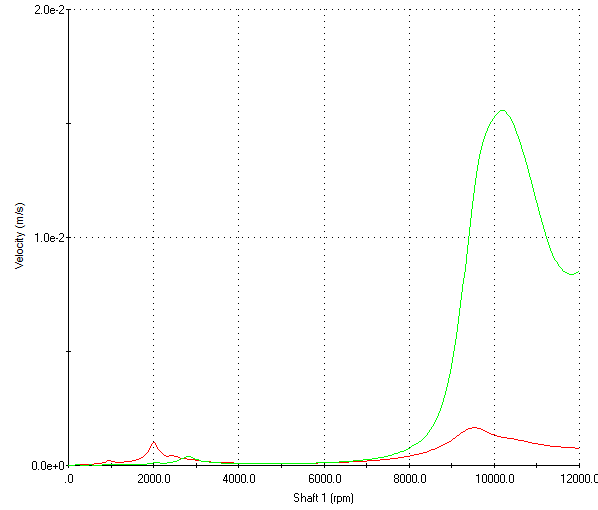
ŞEKİL 13: TORK DALGALANMASI VE RADYAL KUVVETLER İÇİN MOTOR MS VEL CEVABI

Çalışmanın önceki kısımlarında iki düğüm noktası tepki noktası olarak tanımlanmıştır. Bu noktalar potansiyel ivme ölçer noktalarını temsil etmekte ve test datası korelasyonu için kullanılabilir. Tepki düğüm noktalarının Romax içerisinde ayarlanması Şekil 15’de, bu düğüm noktaları kullanılarak elde edilen radyal kuvvet ve tork dalgalanması genlik cevapları Şekil 16’da gösterilmiştir.



ŞEKİL 14: TEPKİ DÜĞÜM NOKTASI ANALİZİ İÇİN AYARLAR

— Harmonic Response - Housing [em_housing_2] - Node ID: 31353 - Velocity - Magnitude - Harmonic multiple 48.0
 — Harmonic Response - Housing [em_housing_2] - Node ID: 9684 - Velocity - Magnitude - Harmonic multiple 48.0



ŞEKİL 15: 48. ORDER RADYAL KUVVETLER VE TORK DALGANMASI DÜĞÜM NOKTASI GENLİK CEVABI

Sonuçlara göre maksimum tepki (peak) 31353. düğüm noktasında 10200 rpm'de motor arka kapağında görülürken, daha küçük bir tepki (peak) muhafaza üzerindeki 9684. düğüm noktasında 2000 rpm'de görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Romax yazılımında elektrikli motor tahrik kaynakları ve NVH analizleri üzerinde durulmuştur. Çalışma kapsamında radyal kuvvet, tork dalgalanması ve mekanik dengesizlik tahriklerinin tanımı yapılmış ve bu tahrikler elektrikli motor içeren bir sisteme entegre edilmiştir. Modelleme işlemlerinin ardından MS Vel cevabı ve tepki düğüm noktaları cevapları elde edilmiştir.

REFERANSLAR

I. Romax Documentation, EM4: NVH Analysis with Romax Evolve.

II. <https://supporttc.romaxtech.com/>.