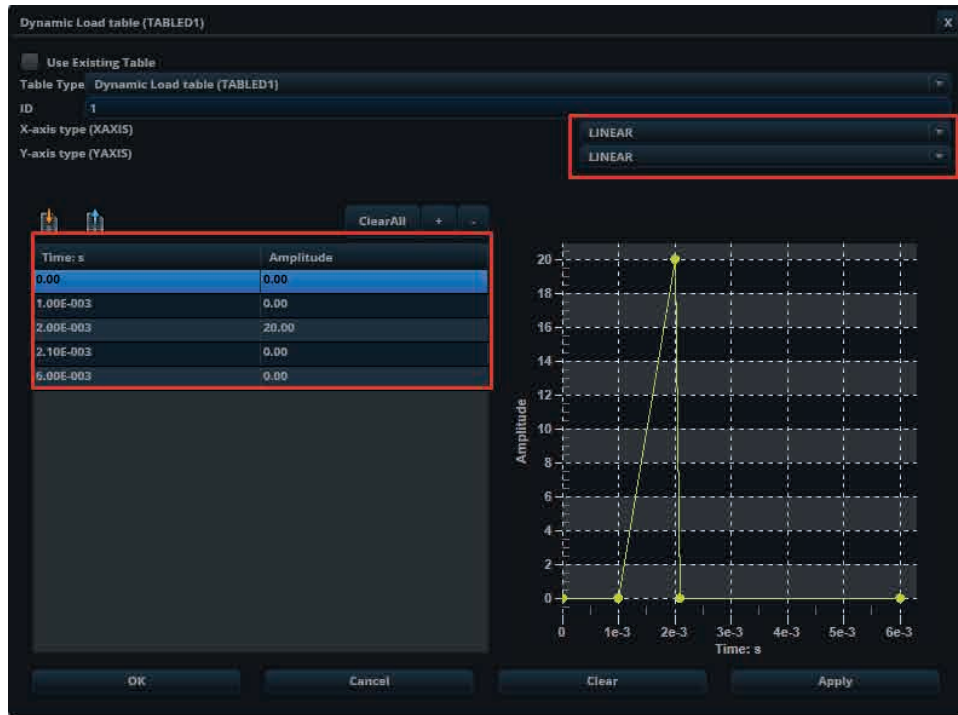


TEKNİK DOKÜMAN



MSC Apex

Modelleme süreçlerinin sadeleştirilmesi ve kullanıcı deneyiminin artırılması amacıyla geliştirilen MSC Apex, özellikle son sürümleriyle birlikte, artık MSC Nastran'ın ileri düzey dinamik analiz yeteneklerini tam anlamıyla desteklemekte; böylece kullanıcıya sadece sezgisel bir modelleme ortamı değil, aynı zamanda son derece güçlü ve entegre bir analiz platformu sunmaktadır. Bu sinerji hem ürün geliştirme sürecini hızlandırmakta hem de mühendislik doğruluğunu bir üst seviyeye taşımaktadır.



BIAS
MÜHENDİSLİK



HEXAGON

Authorised Hexagon reseller

MSC APEX İLE FREKANS CEVAP ANALİZLERİNİN KURGULANMASI

Hazırlayan
Ömer Alan Yapısal Analiz Mühendisi

Tarih: 03/09/2025

Giriş

Mühendislik dünyasında sayısız yapısal analiz yazılımı bulunmasına rağmen, MSC Nastran uzun yıllardır sektördeki yerini sağlamlaştırmış, güvenilirliği ve doğruluğu kanıtlanmış lider bir sonlu elemanlar analiz (FEA) yazılımı olarak öne çıkmaktadır. Havacılıktan otomotive, savunma sanayinden tüketici elektroniğine kadar birçok kritik alanda tercih edilen MSC Nastran, özellikle doğrusal ve doğrusal olmayan statik/dinamik analizlerde sunduğu üstün hesaplama kabiliyetiyle rakiplerinden açıkça ayrılmaktadır.

MSC Nastran'ın mekanik şok, frekans cevap, rastsal titreşim ve benzeri dinamik yüklere karşı sunduğu yüksek doğrulukta çözümler, sistemlerin güvenilirliğini en zorlu koşullar altında dahi garanti altına almayı mümkün kılmaktadır. Bu yönüyle MSC Nastran, dinamik analizler söz konusu olduğunda adeta endüstri standardı haline gelmiş durumdadır.

Modelleme süreçlerinin sadeleştirilmesi ve kullanıcı deneyiminin artırılması amacıyla geliştirilen MSC Apex, özellikle son sürümleriyle birlikte, artık MSC Nastran'ın ileri düzey dinamik analiz yeteneklerini tam anlamıyla desteklemekte; böylece kullanıcıya sadece sezgisel bir modelleme ortamı değil, aynı zamanda son derece güçlü ve entegre bir analiz platformu sunmaktadır. Bu sinerji hem ürün geliştirme sürecini hızlandırmakta hem de mühendislik doğruluğunu bir üst seviyeye taşımaktadır.

Bu yazıda MSC Apex arayüzün kullanılarak frekans cevap analizlerinin nasıl kurgulanabileceği ele alınmıştır.

Frekans Cevap Analizleri

Frekans cevap analizleri, özellikle havacılık, savunma, otomotiv ve uzay endüstrileri gibi titreşim yüklemelerine karşı yüksek dayanıklılık gerektiren alanlarda, yapıların farklı frekanslardaki dinamik tepkilerini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Bu analiz türü, yapının harmonik (sürekli ve periyodik) uyarılara karşı verdiği tepkiyi frekans düzleminde incelemeye olanak tanır ve yapı üzerindeki ivme, titreşim genliği gibi temel analiz çıktılarının değerlendirilmesi için çok önemlidir.

MSC Nastran, frekans cevap analizlerinde geniş çözüm yöntemleri (modal ve direkt) sunarak, sistemin rezonans bölgelerindeki davranışını yüksek doğrulukla öngörebilme imkânı sağlar. Bu sayede, titreşim kaynaklı yapısal bozulmaların ya da sistem arızalarının önceden tespit edilmesi mümkün hale gelir.

MSC Apex, Nastran çözücüsüne doğrudan entegre çalışabildiği için, analiz öncesi ve sonrası süreçler arasında veri kaybı ya da uyumsuzluk yaşanmadan, bütünleşik bir iş akışı oluşturulabilmektedir. Apex üzerinden tanımlanan tüm malzeme, temas ve yükleme koşulları; Nastran tarafından frekans cevap analizinde birebir kullanılabilmekte ve çözümler sonrasında sonuçların Apex üzerinde post-processing işlemleri ile detaylı şekilde görselleştirilmesi mümkün olmaktadır.

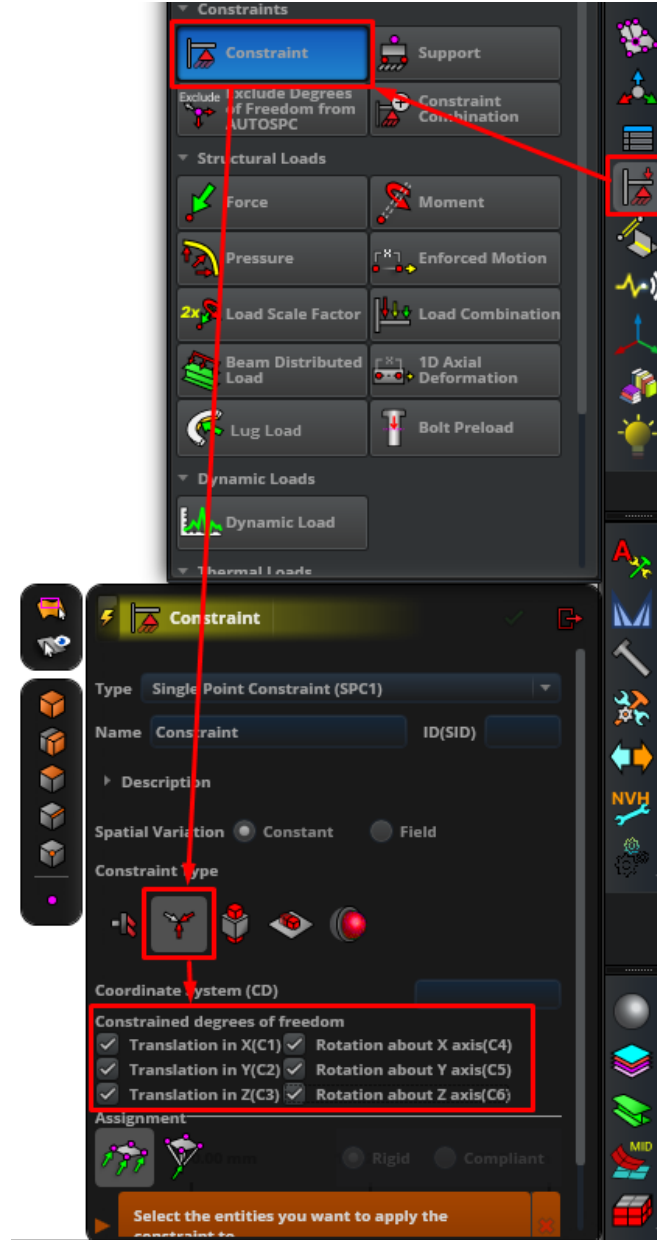
Bu bütünleşik yapı, frekans cevap analizlerinde yüksek model karmaşıklığına rağmen kısa sürelerde güvenilir sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmakta, ayrıca tasarım değişikliklerinin analizlere yansıtılmasını hızlandırmaktadır.

Yük ve Sınır Koşulları

MSC Apex arayüzü içerisinde, test koşullarını temsil edebilecek ve gerekli tahrik tanımını karşılayabilecek yük ve sınır koşulu araçları bulunmaktadır. Bu araçların kullanımı son derece kolay olmakla birlikte, geometri veya mesh üzerinden sınır koşulları ve yükler verilebilmektedir.

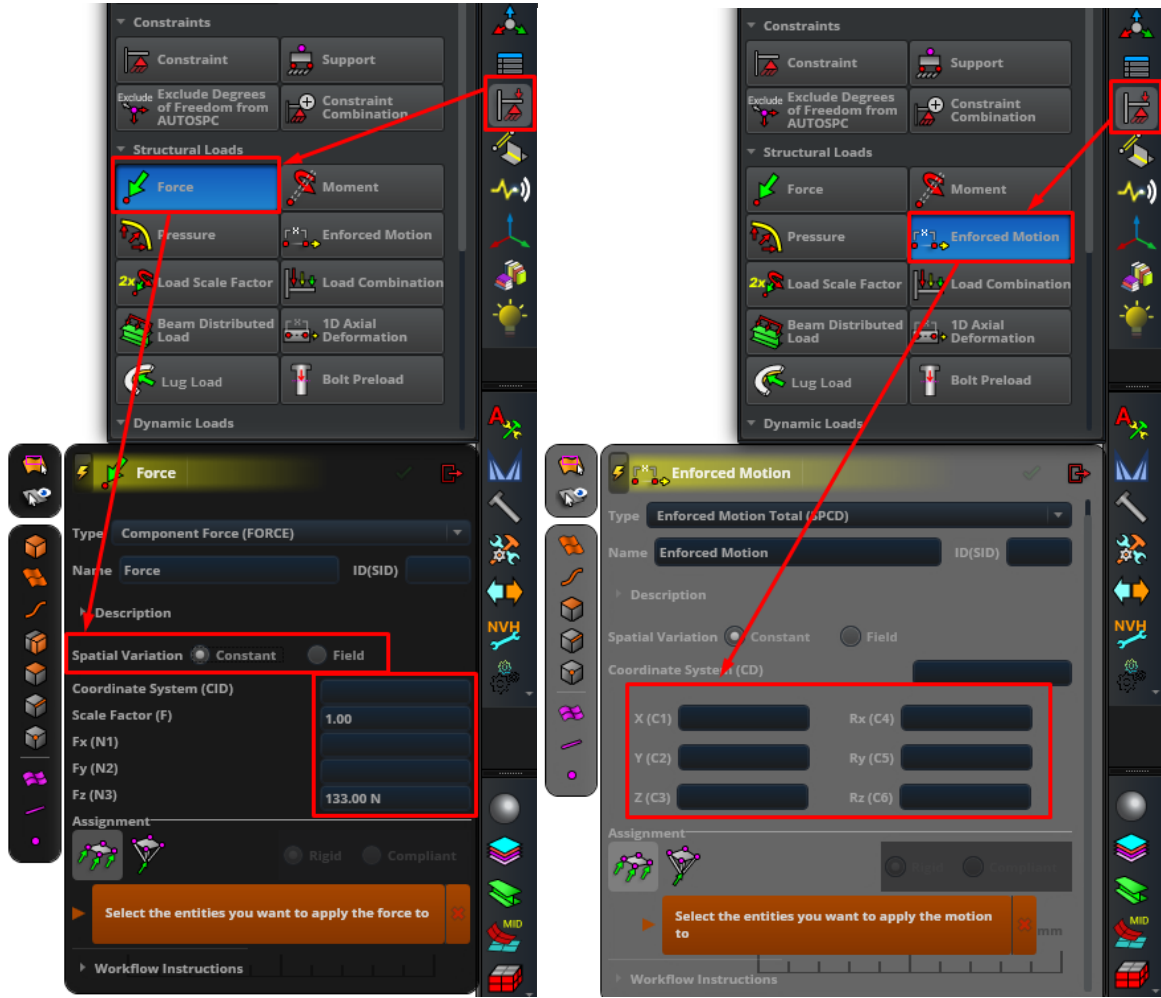
Araçlar menüsü içerisinde bulunan seçim filtresi yardımıyla uygulanacak bölgeler ayrı ayrı seçilebilmektedir ve yine menüde bulunan tercihlerin yapılmasıyla atama işlemi tamamlanmaktadır.

Şekil 1'de "Constraint" aracı ile verilen bir sınır koşulu örneği bulunmaktadır. "General Constraint" metodu kullanılarak sınır koşulu uygulanan bölgelerdeki serbestlik derecelerinin seçilerek kısıtlanması sağlanmıştır. Örnekte, 6 serbestlik derecesi de kısıtlanmıştır.



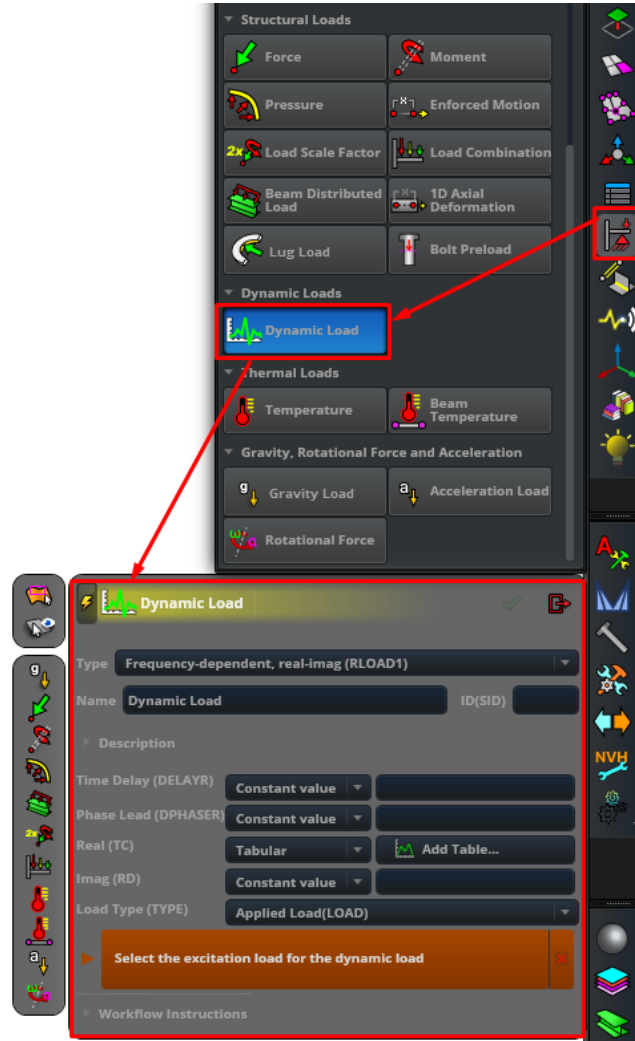
ŞEKİL 1 CONSTRAINT ARACI GÖSTERİMİ

Şekil 2’de yapı üzerinde bulunan tahriği temsil etmek için atanan "Force" ve "Enforced Motion" araçları bulunmaktadır. Çevresel olarak yapı üzerine etkiyen ivme, hız veya deplasman yükleri “Enforced Motion” aracı yardımıyla verilebilmektedir.



ŞEKİL 2 FORCE VE ENFORCED MOTION ARAÇLARI GÖSTERİMİ

Şekil 3'te yapı üzerine atanan yüklerin zamana veya frekansa bağlı olarak tanımlanabilmesini sağlayan "Dynamic Load" aracının görseli bulunmaktadır. Frekans cevap analizleri frekans düzleminde olduğu için, frekansa bağlı bir tablo kullanarak yük senaryosu tanımlanabilmektedir. Aynı zamanda, yapı üzerinde bulunan çevresel etkinin türü "Load Type" satırından seçilerek modele eklenebilmektedir. Load Type satırı içerisinde Load (Yük), Displacement (Deplasman), Velocity (Hız) ve Acceleration (İvme) seçenekleri bulunur.

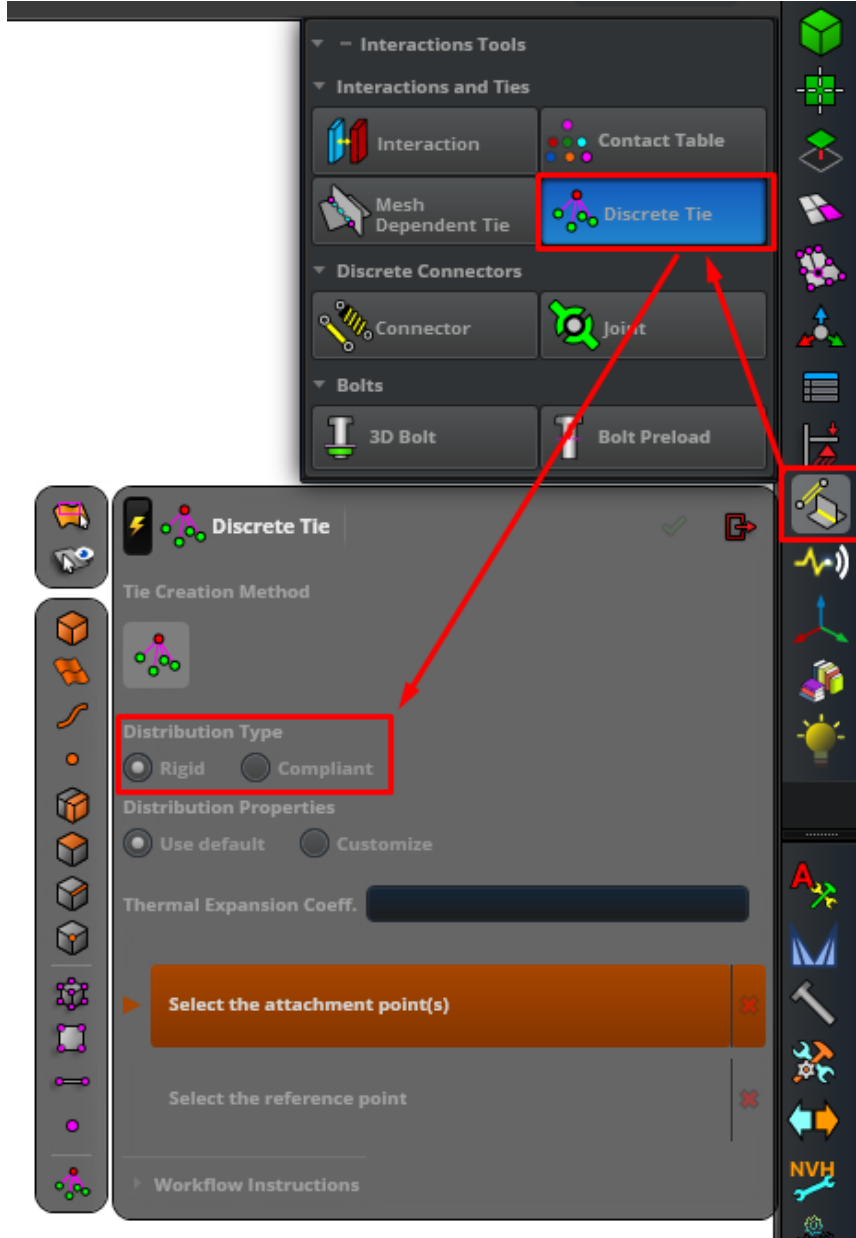


ŞEKİL 3 DYNAMIC LOAD ARACI GÖSTERİMİ

Bağlantı Ağı Seçenekleri

Frekans cevap analizlerinde, yapısal alt bileşenlerin birbirine bağlanması, yük aktarımının temsil edilmesi veya sınır koşullarının idealize edilmesi amacıyla bağlantı ağları yaygın şekilde kullanılır. MSC Nastran'da bu amaçla en sık tercih edilen elemanlar RBE2 ve RBE3 bağlantı elemanlarıdır. RBE2 bağlantı elemanı yükleri dependent nodelar arasında relative displacement olmayacak şekilde aktarırken, RBE3 elemanı ise yapıya rijitlik katmadan independent nodelar arasında yükleri geometrik olarak aktarır. RBE2 elemanın dependent nodeları arasında relative displacement olmadığından yapıya rijitlik katarken, RBE3 elemanı yapıya rijitlik katmaz. Rijit flanşlar, civatalı bağlantılar veya test fişstürlerinin modellenmesinde genellikle RBE2 elemanı kullanılırken, ekipman yüklerinin aktarımında, test veri noktalarındaki yüklerinin aktarımında, fastener modellemelerinde RBE3 elemanı kullanılmaktadır. Yanlış bağlantı tipi kullanımı, özellikle lokal mod şekillerinin bastırılmasına veya yapay rijitlik oluşumuna neden olabilmektedir.

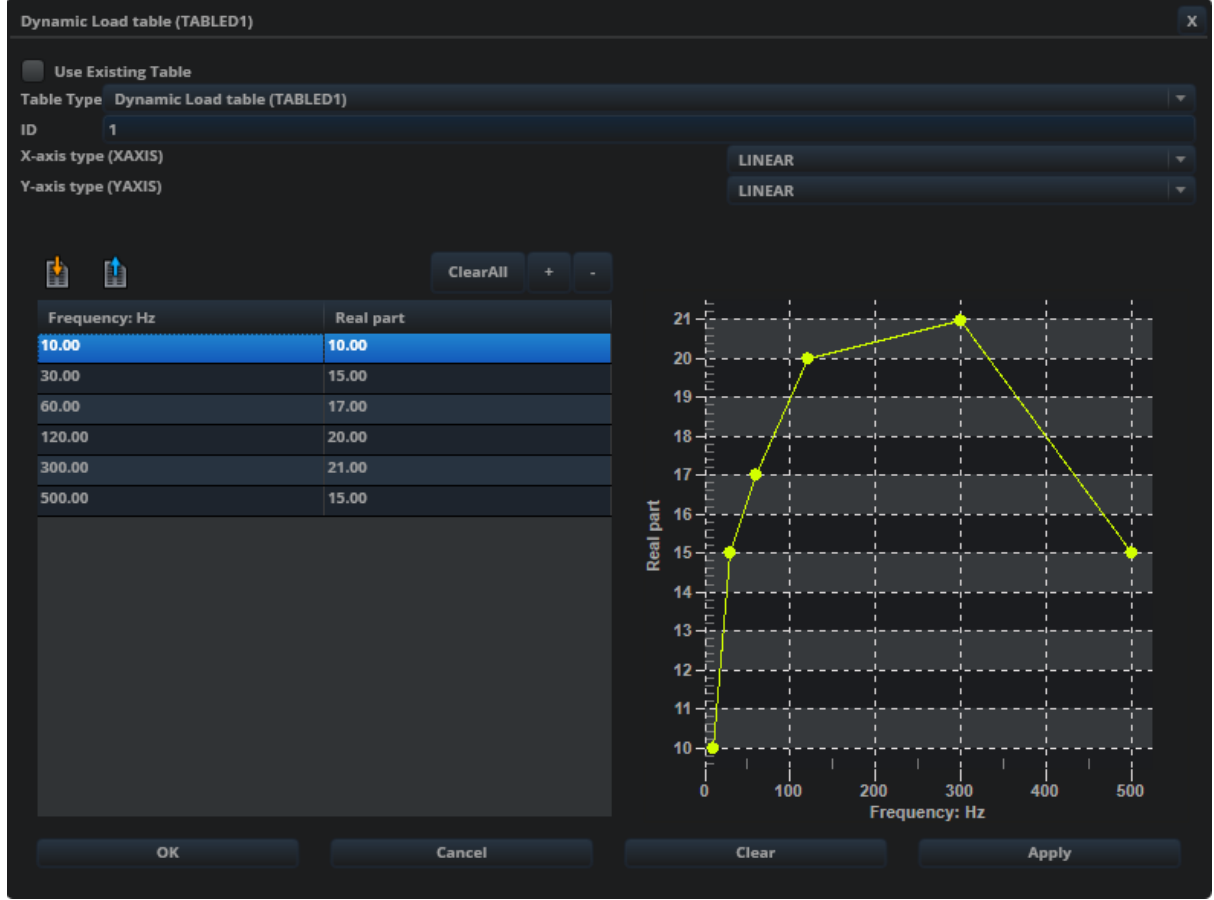
MSC Apex, bu bağlantı elemanlarının tanımlanmasını son derece kullanıcı dostu bir şekilde gerçekleştirmeye olanak tanır. Gelişmiş grafik arayüzü sayesinde, kullanıcılar yalnızca ana düğümü ve bağlı düğüm kümesini seçerek RBE2 veya RBE3 tanımını birkaç saniye içerisinde oluşturabilmektedir. RBE2 ve RBE3 tipi bağlantıların MSC Apex arayüzündeki karşılığı sırasıyla “Rigid” ve “Compliant”dır. Şekil 4’te Rigid ve Compliant bağlantıları oluşturmak için kullanıcılara sunulan Discrete Tie aracı yer almaktadır.



ŞEKİL 4 DISCRETE TIE ARACI GÖSTERİMİ

Senaryo Kurulumu

Frekans cevap analizlerinde doğru ve güvenilir sonuçlar elde edebilmenin ön koşulu, analiz senaryosunun dikkatle tanımlanmasıdır. Bu kapsamda; frekansa bağlı yüklerin, sönümleme parametrelerinin belirlenmesi ve benzeri girdilerin özenle oluşturulması sonucun doğruluğu üzerinde temel unsurlardır. Bu parametrelerin yanlış belirlenmesi, yapının çevresel etkilere karşı verdiği tepkilerin ölçülmesinde büyük hatalara yol açabilmektedir. MSC Apex, bu tür analiz parametrelerinin tanımlanmasında kullanıcılara oldukça güçlü bir arayüz sunar. Öncelikle, frekans tanımlarına uygun yükleme profillerinin doğrudan içe aktarılması ve düzenlenmesi Apex üzerinden oldukça sezgiseldir. Şekil 5'te bu yetenekleri barındıran tablo aracı yer almaktadır.

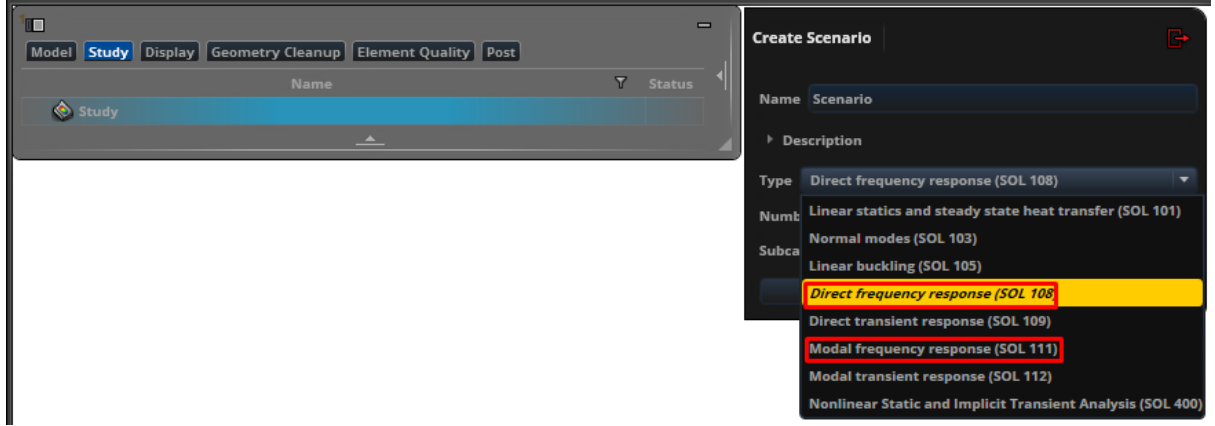


ŞEKİL 5 YÜKLERİN FREKANS BAĞLI GRAFİKLERİ İÇEREN TABLO ARACI

Kullanıcı, periyodik yüklemeyi temsil eden frekans-ivme veya frekans-kuvvet gibi verileri doğrudan uygulayarak yüklemenin fiziksel karşılığını detaylı şekilde tanımlayabilmektedir. MSC Apex'in analiz öncesi kontrolleri sayesinde, tanımlı sönüm değerlerinin tutarlılığı, eksik tanımlar veya uyumsuzluklar çözüm öncesinde tespit edilebilmektedir; bu da analiz döngülerinin sayısını ve hata kaynaklı zaman kayıplarını ciddi oranda azaltır.

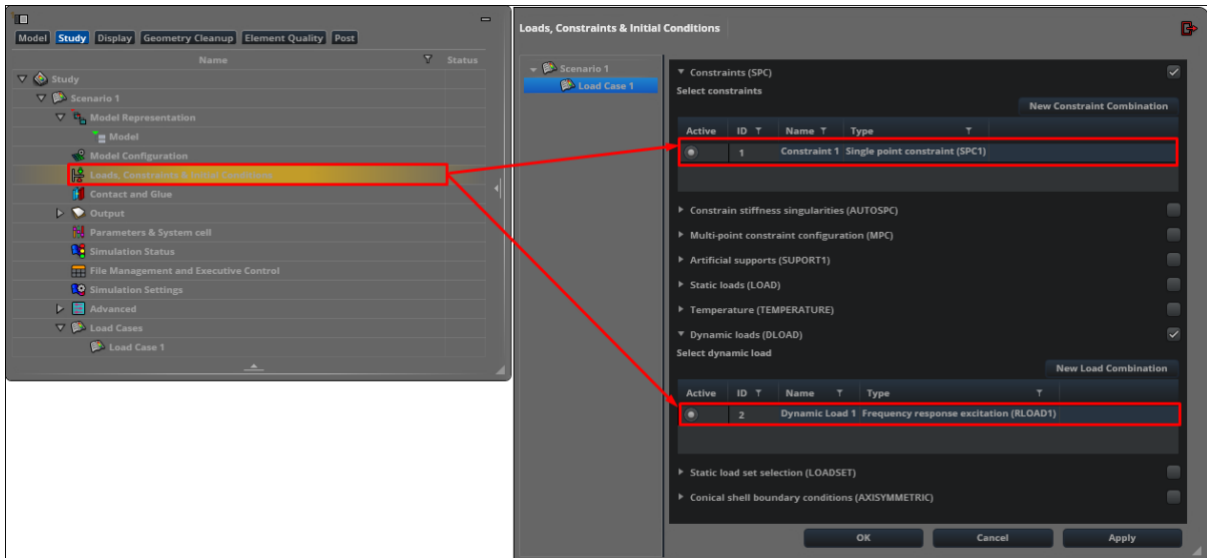
Frekans cevap analizlerinde çözümler genel olarak iki temel yaklaşıma ayrılır: **direct frequency response** ve **modal frequency response** analizler. **Direct frequency response** analiz yöntemi, sistemin tüm serbestlik derecelerini doğrudan çözerek frekans aralığı boyunca yapının davranışını hesaplar. Bu

yaklaşım ile yapılan analizler için, model boyutunun büyük olduğu durumlarda hesaplama maliyeti oldukça yüksektir. **Modal frequency response** analiz ise, yapının doğal frekans modlarını esas alarak çözüm yapar; fiziksel alan yerine modal koordinatlar üzerinden çözümü gerçekleştirir. Bu sayede hesaplama süresi önemli ölçüde azalır. MSC Apex ve Nastran her iki çözüm yöntemini de desteklemekte; kullanıcıların analiz hedeflerine göre doğruluk ve hesaplama verimliliği arasında denge kurmasına olanak tanımaktadır.



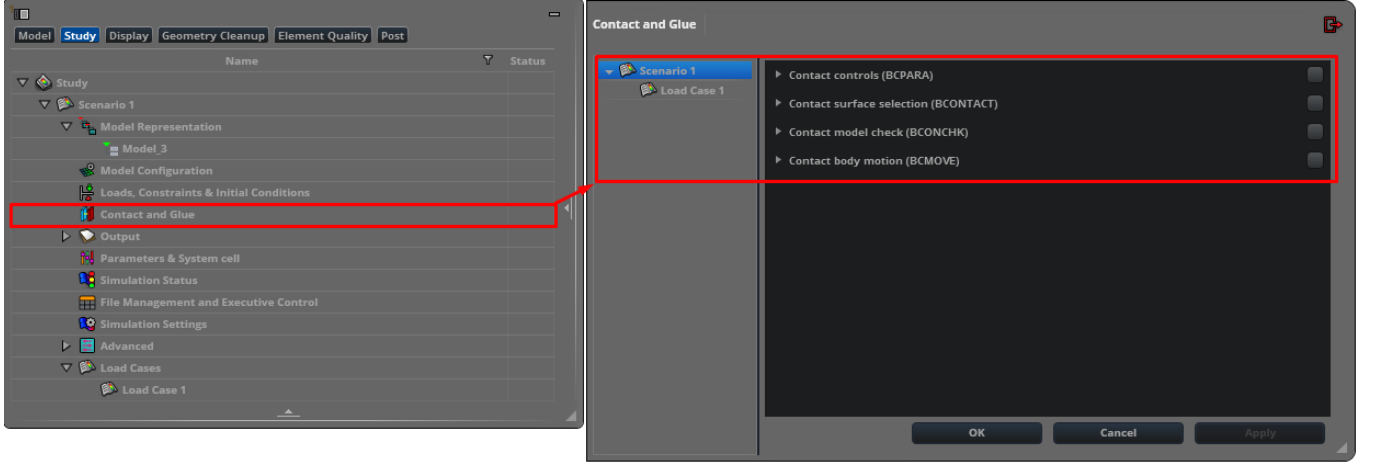
ŞEKİL 6 MSC APEX’TE ANALİZ TİPİ SEKMESİ

Analiz tipi seçildikten sonra, modelin hangi kısımlarının analize dahil olacağı, “Model Representation” kısmından seçilir. Bir altta bulunan “Model Configuration” sekmesinden ise yapısal olmayan kütleler ve geometrik kusurlar gibi detay yapılandırılmalar oluşturulabilmektedir. Bir sonraki adım, modellenen yüklerin ve sınır koşullarının modele dahil edilmesi adımı olacaktır. Bu kısım önemlidir. Dynamic Load tanımlandıktan sonra modele statik olarak oluşturulan yük eklenmemeli, sadece dinamik yük eklenmelidir. Apex arayüzü ile birden fazla yük ve sınır koşulu kendi aralarında birleştirilerek tek bir yük ve tek bir sınır koşulu haline getirilebilmektedir. Ek olarak, başlangıç koşulları, termal yükler gibi girdiler de bu pencere içerisinden oluşturulup modele eklenebilmektedir.



ŞEKİL 7 YÜK VE SINIR KOŞULLARI PENCERESİ

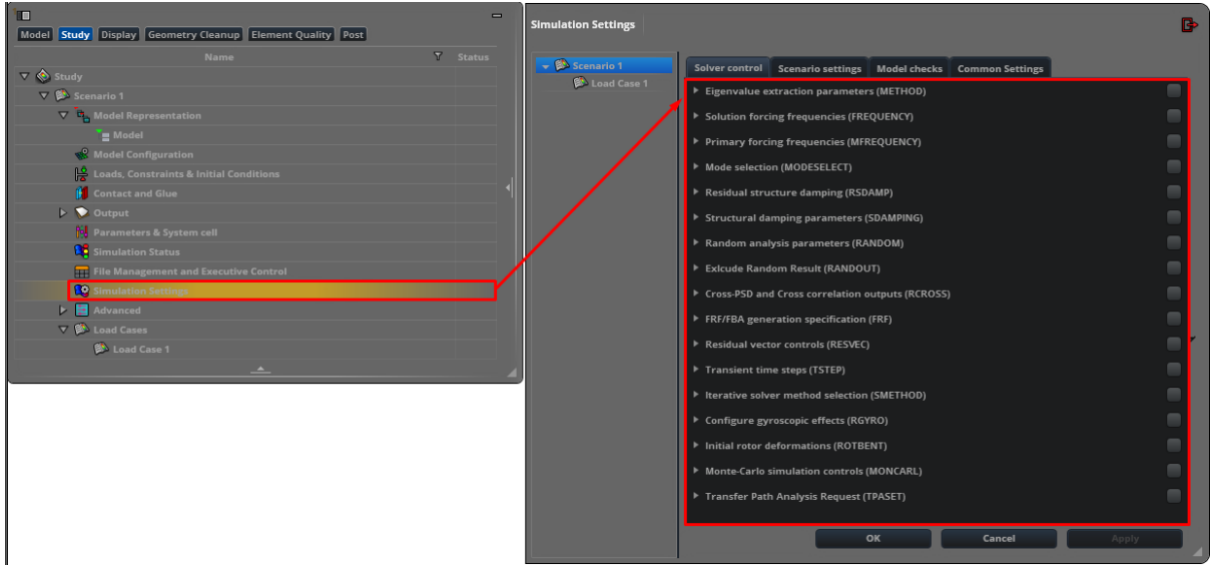
Frekans cevap analizlerinde, bileşenler arası yük transferinin doğru modellenenebilmesi için glue contact (yapışkan-kaynak bağ) tanımları büyük önem taşır. Glue contact tanımları iki yüzey arasında sabit fakat esnek bağlar oluşturur; fiziksel temas yerine idealize edilmiş sürekli bağ modeli sağlar ve çoğunlukla yapıştırılmış bağlantılar veya sabit montajlar için kullanılır. Yanlış ya da eksik kaynak tanımları, özellikle yüklerin bağlantı noktalarından doğru şekilde aktarılmasını engelleyerek hem yerel deformasyonlarda hem de genel sistem tepkisinde ciddi sapmalara neden olabilmektedir. MSC Nastran bu tür bağları temas çiftleri veya eleman bazlı bağlantılar şeklinde detaylı biçimde tanımlamaya imkân tanırken, MSC Apex ise bu tanımları hem geometri hem de mesh üzerinden sezgisel ve görsel olarak oluşturma konusunda güçlü araçlar sunarak süreci büyük ölçüde kolaylaştırmaktadır. Contact and Glue penceresi Şekil 8’de gösterilmektedir.



ŞEKİL 8 CONTACT AND GLUE PENCERESİ

Bir altta bulunan sekme “Output” sekmesidir. Bu sekme yardımıyla çıktı isterlerinin girildiği pencereler açılmaktadır. Bu pencerelerden analiz sonucu olarak neler istendiği ve çıktı olarak alınan sonuçların hangi metotlarla hesaplanacağı girilmektedir. Bu sekmenin altında ise “Parameters and System Cells” yer almaktadır. Buradaki pencere ile kullanıcı tarafından analiz için oluşturulan parametre setleri, analize dahil edilebilmektedir.

En önemli pencerelerden biri olarak “Simulation Settings” penceresi sayılabilmektedir. Simulation Settings penceresi yardımıyla analiz için gerekli olan indirgeme noktaları, kullanılan iteratif metotlar, model kontrol yöntemleri ve sönümlleme katsayıları gibi girdiler eklenmektedir. Simulation Settings penceresi Şekil 9’da gösterilmektedir.



ŞEKİL 9 SIMULATION SETTINGS PENCERESİ

Şekil 9’da gösterilen pencere ile birlikte analiz kurulumu için önemli olan adımlar tamamlanmıştır. Modelin barındığı karmaşıklık seviyesine göre daha fazla detay eklenebilmektedir. Fakat genel olarak frekans cevap analizi için eklenmesi gereken tüm maddeler, görsellerden anlaşılabilceği gibi bir sıra içerisinde listelenmiş ve kullanıcılara sunulmuştur.

Sonuç

Modelleme sürecinin sezgisel ve güvenilir şekilde yürütülebilmesi için geliştirilen MSC Apex, Nastran’ın gelişmiş dinamik analiz yeteneklerini tam olarak destekleyen bir ön ve son işlem platformu olarak öne çıkmaktadır. Apex üzerinden gerçekleştirilen RBE tanımları, temas ilişkileri, frekans tabanlı yüklemeleri ve çözüm parametreleri, analiz sürecinin hem hızını hem de doğruluğunu artırmakta; mühendislik iş akışlarını daha verimli hale getirmektedir.

Sonuç olarak, MSC Nastran ve MSC Apex’in birlikte kullanımı, frekans cevap analizlerinde hem teknik doğruluk hem de operasyonel verimlilik açısından güçlü bir çözüm seti sunmakta; yüksek güvenilirlik gerektiren sistemlerin tasarım ve doğrulama süreçlerine önemli katkı sağlamaktadır.

Referanslar

1. MSC Apex 2024.2 Release Guide
2. MSC Nastran 2024.2 Quick Reference Guide