

## Marc Yakınsama Problemlerinin Çözümleri

Hazırlayan
Resul Demir Lider Yapısal Analiz Mühendisi

Tarih: 10/02/2022

### GİRİŞ

Doğrusal analizler için FEA (Sonlu Eleman Analizi) modellerini hazırlamak kolaydır – hazırlanan bu analiz modellerini çözdürmek için aşağıda belirtilen parametrelere ihtiyacımız vardır:

- Uygun bir sonlu eleman ağı (çözülemez kadar bozuk eleman olmamalıdır)
- Uygun malzeme ve geometrik özellikler
- Yapının yük altında serbest hareket etmesini engelleyecek sınır koşullarının tanımlanması

Yukarıda belirtilen gereksinimler sadece doğrusal analiz modellerini koşturmak için gerekli olan parametrelerdir, doğru sonuçları elde etmek için daha derine inilmesi gerekmektedir.

Doğrusal olmayan analizlerde ise daha fazla problem ortaya çıkar ve yanlış gidebilecek (ve çoğu zaman giden) çok daha fazla parametre bulunmaktadır.

**En yaygın sorunlardan biri modellerin yakınsamaması:** FEA (Sonlu Elemanlar Analizi) çözümleri analiz esnasında sonuca ulaşmak için belirli bir iterasyon yapmaktadır. Model kurulumu sırasında kullanıcının belirlediği veya yazılımda varsayılan iterasyon sayısında analiz yakınsama yapmayabilir ve daha sonra daha küçük bir adımda iterasyon denir. Tekrar yakınsama olmaz. Bu daha küçük adımlardaki yapıya uygulanan yükün iyice küçülene kadar,

çözücü minimum adıma ulaşmış durana veya kullanıcı sıkılıp çalışmayı sonlandırana kadar tekrarlanır.

Doğrusal olmayan analiz modellerinde hata ayıklama konusunda deneyimlerimize göre yakınsama problemlerinin bir numaralı nedeninin çözücüye vermiş olduğumuz girdilerde yanlışlık olmasıdır. Bazı kritik parçalar modele dahil edilmemiş olabilir. Eksik sınır koşulu, eksik kontak ilişkisi tanımlaması, sürtünme tanımlaması veya doğru tanımlanmayan malzeme akma eğrisi yakınsama problemlerine sebep olabilmektedir.

Yakınsamayan modellerde yapılan ilk değişiklikler, belirlenen minimum adım boyutunu azaltmak veya yakınsama toleranslarını gevşetmektir. İlk değişiklik analiz modelinin yakınsamasına yardımcı olmamakta ve çalışma süresini arttırmaktadır. İkincisi, altta yatan sorunları ele almamakla birlikte doğruluğu önemli ölçüde azaltmaktadır. Bunlardan sonra kullanıcı, yakınsama problemini çözmek amacıyla çözücüde belirtilen iterasyon sayısını arttırmaktadır, yapılan bu değişiklik bazen işe yaramaktadır, bazen herhangi bir sonuç elde edilememektedir. Sonraki aşamada kontak ayarları, malzeme ve sınır koşulları değiştirilir.

Problemin büyük olasılıkla fiziğinden kaynaklı olmasından dolayı, tahmin edilebileceği gibi, modelin çalışmasını sağlamak için rastgele bir şeyler denemek bu yaklaşımı çok verimsiz kılmaktadır.

Bu yazıda, yakınsama problemlerinin nedenlerinden bahsedilecektir. Daha da önemlisi, doğrusal olmayan Sonlu Eleman modellerinde hata ayıklamaya sistematik olarak yaklaşmanın yolları tartışılacaktır. Bunların bir kısmı herhangi bir FEA kodu için genel olsa da, bu makalenin asıl amacı Marc modellerinde hata ayıklamaktır.

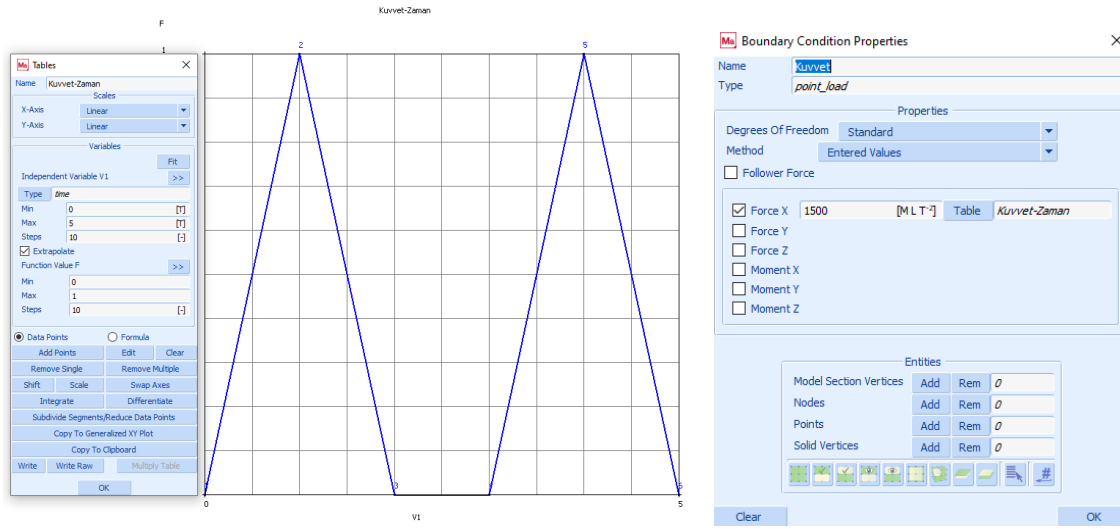
## YÜK ARTIŞLARI

Doğrusal olmayan analizde genellikle uygulanan yük “yavaşça” arttırılarak uygulanmalıdır. Her bir yükleme adımında (her bir yük artış adımında) çözücü, yakınsama kriterleri karşılanana kadar iterasyon yapmaktadır. Her bir yük artış adımında ilgili yakınsama sağlandığında sonuçlar

depolanır ve bir sonraki yük adımına geçilerek iterasyonlar devam eder. Daha düşük seviyede bir yük artışı yapıldığında analizler daha kolay yakınsamaktadır.

Kontak ilişkileri bu kuralda istisnadır, ilerleyen bölümlerde detaylandırılacaktır.

Marc'ta herhangi bir yük, bir "tablo" kullanılarak "zaman"ın bir fonksiyonu olarak ölçeklendirilebilmektedir. Marc'taki "zaman" veya "tablo" tanımlamaları hakkında bilgileri "Users Guide" içerisinde bulabilirsiniz. Örnek bir tablo ve yük tanımlaması **Resim 1** 'de paylaşılmıştır.



**Resim 1: Örnek kuvvet-zaman tablosu ve yük tanımlaması**

Kullanıcı bir tabloyu bir yük ile ilişkilendirmez ise analiz esnasında sorun ortaya çıkabilir: Yük uygulama adımlarına bağlı olarak (değişken (adaptive) ve sabit adım (fixed step)), çözücü, yükün tek bir adımda uygulanmak istendiğini varsayacaktır. Bazı yüklerin tek adımda uygulanamayacak kadar büyük olduğunu varsayarsak, çözücü, yükü tek adımda uygulamaya çalıştığında yakınsayamaz ve iterasyon zaman adımını küçültür. Çözücü, yükü hemen uygulanmak istendiğini düşündüğünden (bir tablo belirtilmediği için), daha küçük zaman adımında tam yükü tekrar uygulamaktadır. Bu bir çözücü problemi değildir: Kullanıcı tarafından yük çok belirsiz bir şekilde girdi olarak verildiği için çözücünün varsayılan yük ayarları ile uygulamasına izin verilir.

Yükü zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlanan bir tablo ile tanımlamak, belirsizliği tamamen ortadan kaldırmaktadır. Eğer bu tablo tanımlaması yapıldığı durumda Marc'ın yükü uygulamasında yanlışlık yapma olasılığı yoktur.

Kısacası, HER ZAMAN Marc içinde tanımlanan her yükte bir tablo kullanılmalıdır. Bunu yapmak, model kurulum süresine 30 saniye ekleyebilir, ancak size günlerce hata ayıklama süresi kazandıracaktır.

## YAKINSAMA KRİTERLERİ

Yakınsama kriterleri, yaklaşık sonucun hangi koşullar altında "yeterince iyi" olduğunu tanımlamaktadır. Doğrusal analizlerde mükemmel yakınsamaya ulaşabilir bu yüzden doğrusal olmayan analizlerde "yaklaşık sonuç" elde edilir. Yapısal yük senaryoları için Marc'ta üç tür yakınsama kriteri bulunmaktadır:

- **Deplasman (Displacement)**

İterasyonlar arasındaki deplasmanlarda meydana gelen maksimum değişiklik yeterince küçük olduğunda yakınsama gerçekleşmektedir.

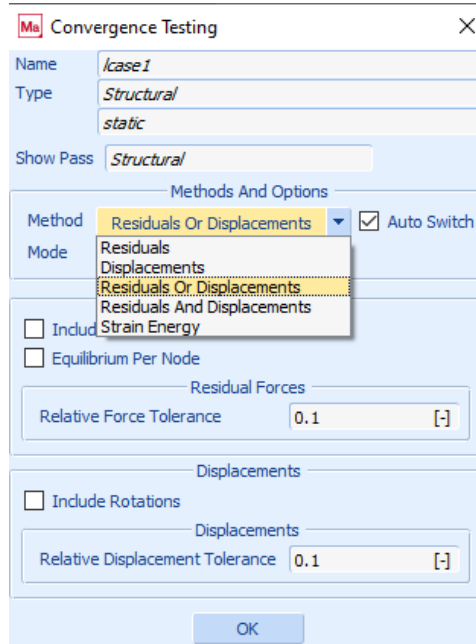
- **Kalıntı (Residual) (Dengesiz Kuvvet / Moment)**

Herhangi bir düğüm noktasındaki uygulanan yük ile reaksiyon yükü arasındaki maksimum fark yeterince küçük olduğunda yakınsama gerçekleşmektedir.

- **Enerji**

İterasyonlar arasındaki gerinim enerjilerindeki maksimum fark yeterince küçük olduğunda yakınsama gerçekleşmektedir.

Marc içerisinde yakınsama kriterlerinin seçildiği kısım **Resim 2**'de gösterilmiştir.



Resim 2: Marc yakınsama kriterleri

Yakınsama kriterleri, mutlak değerlere veya bağıl değerlere dayanabilir. İzin verilen “hata” uygulanan yük ile derecelendirildiğinden, bağıl değerler daha anlamlı olmaktadır. Mühendislik terimleriyle: Maksimum yük 1N ise, 10N dengesiz yük kabul edilemez. Öte yandan, maksimum yük 1MN ise, 10N dengesiz yük makuldür.

Basit bir nedenden dolayı “Enerji” kriteri göz ardı edilmektedir: Marc, Deplasman ve Artık-kriterlerini birlikte kullanmaya izin vermektedir, ancak Enerji kriteri tek başına kullanılmamaktadır.

Birinin veya diğerinin “bağıl” kontrolle yakınsamadığı durumlar bulunmaktadır:

- Ardışık adımlar arasında yük sabit kalırsa, her ikisi için de hesaplanan deplasman aynı olmalıdır. Artık yakınsama kontrolü, bir önceki adım için zaten karşılandığından, ardışık adım için otomatik olarak atlanır. Deplasman yakınsaması neredeyse imkansızdır çünkü deplasmandaki değişiklik sıfırdır ve sıfır bölü sıfır belirsizdir.
- Uygulanan yük mükemmel bir şekilde dengelenirse, reaksiyon kuvvetleri sıfır olabilir. Bağıl artık kontrolü reaksiyon kuvvetine bölüdüğünden, yine sıfır bölü sıfır elde edilir.

Başka bir deyişle, kriterlerden biri aksini söylese bile model yakınsayabilir. Bunun nedeni, söz konusu kriterin o özel durum için geçerli bir kontrol olmamasıdır.

Bunları tespit etmek oldukça kolaydır: analiz esnasında oluşan log dosyasına bakıldığında, burada yakınsama değerleri ve oranları yazmaktadır. Aşağıdaki örnekte, iterasyonların biri için log dosyasındaki bilgileri gösterilmektedir. "Çevrim sayısı (cycle number)" iterasyon numarasıdır. "Tekrarlanan çevrim (recycled)" anlamı analizin yakınsamadığı ve başka bir iterasyonun gerçekleştirileceği anlamına gelmektedir. Bu örnekte, hem artık kontrolü hem de deplasman kontrolü için yakınsama oranları 0,001'dir.

Artık kontrol için, "artık kuvvet", "reaksiyon kuvveti" ile bölünerek "artık yakınsama oranı" elde edilir. Bu nedenle kalıntı kontrolü açısından analiz yakınsaktır.

Deplasman kontrolünde "Deplasman yakınsama oranını (Displacement converge ratio)" elde etmek için "Deplasmandaki değişim (Displacement change)" (önceki iterasyon adımı ile şimdiki iterasyon adımı arasında deplasmandaki değişim) "Deplasman artışına (Displacement increment)" bölünür. Aşağıdaki örnekte de görülebileceği gibi belirlenen yakınsama oranına ulaşamadığı için bu analiz modeli henüz yakınsak değildir.

```
start of assembly      cycle number is      5
wall time =           21.00

start of matrix solution
wall time =           23.00

end of matrix solution
wall time =           24.00

maximum residual force at node 167439 degree of freedom 1 is equal to 2.632E+01
maximum reaction force at node 163127 degree of freedom 1 is equal to 1.368E+05
residual convergence ratio 1.925E-04

maximum displacement change at node 172825 degree of freedom 2 is equal to 2.282E-01
maximum displacement increment at node 172798 degree of freedom 2 is equal to 1.241E+00
displacement convergence ratio 1.840E-01

increment will be recycled
```

Resim 3: Örnek log dosyası

"Maksimum tepki kuvveti (Maximum reaction force)" veya "Maksimum deplasman artışı (Maximum displacement increment)" sifıra yakınsa, bu kriterin geçersiz olduğunu veya modelde henüz yük olmadığını gösterir.

Bu örnek ayrıca, model neredeyse kuvvet dengesindeyken (düşük artık oranı nedeniyle), deplasman değerlerinin iterasyonlar arasında hala önemli miktarda değiştiğini göstermektedir. Bu, şunlardan birine işaret eder:

- Model bazı yönlerde düşük katılığa sahiptir. Aksi takdirde, deplasmandaki küçük bir değişiklik, tepki kuvvetinde veya dengesiz yükte büyük bir değişikliğe neden olur.
- Denge konumunda olmayan Kontak / Sürtünme – modelin bir kısmı hala doğru konumuna “kayıyor” olabilir.

Marc için varsayılan toleransın gerçekten kaba değerler olduğu unutulmamalıdır "0,1" (veya %10). Artık kontrol için, "herhangi bir düğüm noktasındaki dengesizlik yükü, maksimum reaksiyon kuvvetinin %10'u mertebesindeyse, sonucu yakınsanmış olarak ele alın". Modeli doğrulamak için yalnızca varsayılan değerler kullanılmalıdır (yük vb.).

### **Özetle, yakınsama kriterleri ve toleranslar söz konusu olduğunda:**

- Kriter seçiminin analiz türü için uygun olup olmadığından emin olunmalıdır.
- Makul sonuçlar isteniyorsa, tolerans(lar) seçimleri varsayılanlardan çok daha düşük olmalıdır. Bu, yakınsamayı zorlaştıracaktır, ancak yakınsama probleminin gerçek nedenini gösterecektir.

İdeal olarak, ikisinden biri (açıklanabilir) bir nedenle seçilmediği sürece “artık ve deplasman (Residuals and Displacements)” seçeneği kullanılmalıdır.

Ayrıca log dosyasındaki yakınsama değerlerine ve oranlarına bakmadan asla yakınsama yapmayan bir modelde herhangi bir ayar değiştirilmemelidir. Bu, en yüksek dengesiz yükün hangi düğüm noktasında olduğunu, en yüksek dengesizliğin hangi yönde olduğunu, söz konusu artış için deplasman veya artık kontrolünün geçerli olup olmadığını ve hangi yakınsama kriterinin yakınsamaya en uzak olduğunu göstermektedir. Bu, sorunun ne olabileceğine dair bir ipucu vermektedir.

## **KONTAK VE SÜRTÜNME**

Kontak ve sürtünmenin tipik olarak iki olası etkisi vardır: Yakınsama için gereken iterasyon sayısını önemli ölçüde artırabilir ve/veya yakınsamanın imkansız hale gelmesine neden olabilir.

İterasyonlardaki artış, kontakta doğasında bulunan ileri seviyede doğrusal olmama (kontak yoksa sıfır katılık, kontak halindeyken sonsuz katılık) ve tam olarak hangi düğüm noktalarının kontak halinde olduğunu bulma ihtiyacından kaynaklanmaktadır.

Kontaklı modeller için yakınsamanın imkansız olduğu durumlar vardır. Bu fiziki bir problemdir, çözücünden kaynaklı bir problem değildir. Bazı örnekler:

- Parçalar arasında ayrılmaya neden olacak kadar büyük bir yük uygulandığında, başka bir bileşenle yalnızca kontak yoluyla "kısıtlanmış" bir bileşenin statik bir çözümü yoktur: Ayrıldıktan sonra yük, bir parçanın hızlanmasına neden olur ve bu da dinamik bir çözüm gerektirir.
- İki yapı arasında sürtünme tanımlanmadan yapılan analizlerde bütün yönlerde yapı sabitlenemeyecektir. Sürtünmeye izin verilse bile, yalnızca kayma başlangıcına kadar geçerli bir çözüme sahip olacaktır.

Aşağıdakine benzer bir mesaj da görülebilir:

“Iterative penetration checking has reached 0.180175 of total increment”

Bu, iterasyonlar arasındaki deplasman değişikliği, kontak davranışı geçersiz olacak kadar büyük olduğunda meydana gelir. Ardından, deplasman değişikliğini daha makul bir değere (yukarıdaki örnekte amaçlanan artışın 0,18'i) ölçeklendirir. Bu nadiren bir kontak problemdir çünkü modelin herhangi bir yönde katılığının olmadığını veya çok düşük olduğunu göstermektedir.

#### **Kontaktan kaynaklı hatalar şu şekilde çözülebilir:**

1. İlk olarak "kontak durumu (Contact status)" sonucu kontrol edilmelidir (kontakta düğüm noktalarının değeri "1"dir). Analizde kontak halinde olması gereken düğüm noktalarının kontak halinde olduğundan ve kontak halinde olmaması gereken hiçbir alanın kontak halinde olmadığından emin olunmalıdır.  
Kontak durumunda olmaması gereken bölgeler varsa, kontak mesafe tanımlaması değiştirilmemelidir. Neredeyse her zaman bunun sonlu eleman ağından kaynaklı bir sorun olduğu anlamına gelir. Ne olduğu bulunmalı ve sonlu eleman ağı düzeltilmelidir.
2. Modelin yakınsak olup olmadığını görmek için modelde iki parça arasında tanımlanan kontak ilişkileri "ayrılmaz (glue)" olarak değiştirilmelidir. Bu, yakınsama probleminin kontaktan kaynaklanıp kaynaklanmadığını görmek için yapılmaktadır.
  - Model hala yakınsamıyorsa, modeldeki tek sorun kontak değildir. Diğer sorunlar çözülene kadar kontak ilişkisi "ayrılmaz (glue)" halde bırakılmalıdır, ardından ayrılabilir kontak tanımlaması yapılabilir.
  - Yukarıdaki işlem sonrası model yakınsamıyorsa, hangi kontak çiftinin/çiftlerinin soruna neden olduğunu bulmak için farklı parçalar arasındaki kontak aşamalı olarak tekrar "ayrılabilir (touch)" olarak değiştirilmelidir. Sorunun muhtemelen “fiziksel” olabileceği

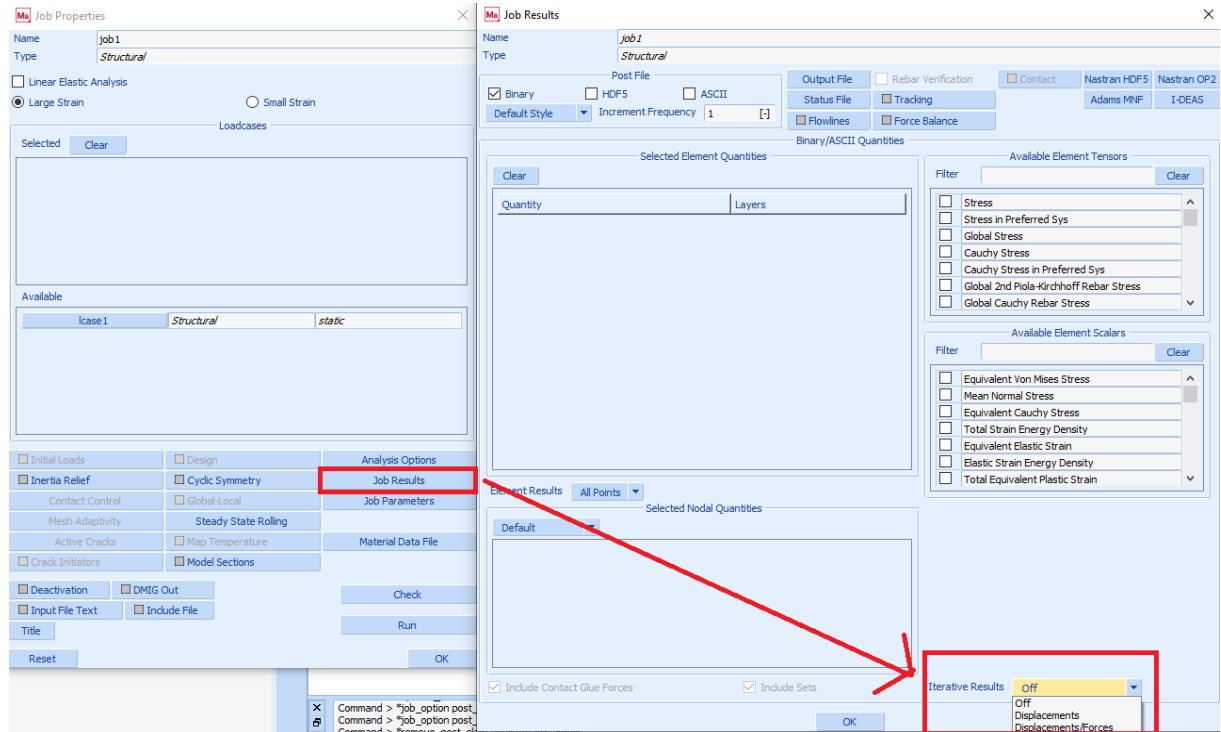


unutulmamalıdır (örneğin yakınsama mümkün olmayabilir veya sürtünme kullanılmış olmalıdır)

3. Yakınsama problemi yaşanan iterasyonlar için sonuç istenmelidir. Bu, aşağıdaki bölümde daha ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

## İTERATİF SONUÇLAR

Bu çok güçlü bir hata ayıklama aracıdır: İstendiğinde, sonuç dosyasına kısmi yakınsamamış sonuçları yazar. Burada sadece deplasman, tepki kuvveti ve kontak sonuçları yazdırılabilmektedir. Etkinleştirmek için Marc'ta sonuçlar kısmından "iteratif sonuçlar (iterative results)" seçeneği aktifleştirilmelidir. **Resim 4**'te ilgili seçeneğin nasıl aktifleştirileceği gösterilmiştir.



Resim 4: Marc iteratif sonuç (iterative results) aktifleştirme menüsü

Bu seçenek, doğrusal olmayan modellerde hata ayıklamanın ana sorunlarından birini ele alır, yani yakınsama olmadığı için neyin yanlış gittiğini bulmak için elde hiçbir sonuç yoktur. Yakınsamamış iterasyonlardan elde edilen deplasman grafikleri genellikle sorunun nerede olduğunu bulmak için kullanılabilir. Örnek olarak:

- Fazla hareket etmemesi gereken bölgeler
- Çok büyük yükleme adımları nedeniyle kontak ilişkilerinde yaşanan kayıplar
- Meydana gelen, muhtemelen fiziksel dengesizliğe neden olan kayma

Model yakınsamaya başladığında bu seçenek kapatılmalıdır - açık bırakılırsa sonuç dosya boyutu gereksiz yere büyüyecektir.

## SONUÇ

Yakınsama problemlerini çözmek için belli bir prosedür izlenmezse, rastgele deneyerek sorunu çözmek çoğunlukla mümkün olmayacaktır. Önerilen prosedür aşağıdaki gibidir:

- Tüm yüklerin kendisine bağlı geçerli bir tabloya sahip olduğundan emin olunmalıdır. Ayrıca yük değerlerinin beklendiği gibi ve doğru birimlerde olduğundan emin olunmalıdır.
- Tüm malzeme değerleri ve tabloları kontrol edilmelidir.
- Yakınsama kriterlerinin ve değerlerinin makul olup olmadığı kontrol edilmelidir.
- Yakınsama problem yaşanmış iterasyonlar sırasında ne olduğunu görmek için "iteratif sonuçlar (iterative results)" seçeneği etkinleştirilmelidir.
- Kontak ilişkisi bulunan modellerde tanımlanan ayrılabilir kontak ilişki tanımı yerine ayrılmaz kontak ilişkisi tanımlanmalıdır.

Modeli birkaç iterasyon için çalıştırdıktan sonra analiz durdurulmalı ve iteratif sonuçlara göz atılmalıdır. Bu genellikle sorunun nedenine dair ipuçları vermektedir. Log dosyasında bulunan yakınsama değerleri ve yakınsama oranları da yakınsama sorunlarını belirlemek için yararlı bir araçtır. Yukarıda belirtilen prosedür adımlarını takip etmek modelde hata ayıklamak için gereken süreyi önemli ölçüde azaltabilir.