

UYGUN SONLU ELEMAN GEOMETRİSİNİN BELİRLENMESİ VE MESH (AĞ) KALİTESİNİN ARTIRILMASI

ANALİZ İÇİN UYGUN GEOMETRİ BELİRLEME

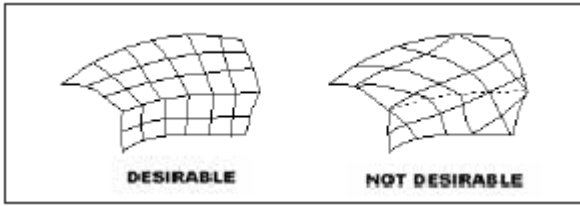
Amaç ideal analiz için tasarım aşamasında uygun ürün dizaynı belirlemektir. Eğer bu yola bağlı kalırsanız geometri analize uygun gelişir ve analiz geometriyi yönlendirebilir.

Eğer analiz başlangıçta geometriyi kontrol ederse çalışma daha verimli hale gelecektir. Analizdeki amaca bağlı kalırsak, analize çok sayıda yapısal ama kaba tasarımla başlamak çok daha avantajlı olacaktır.

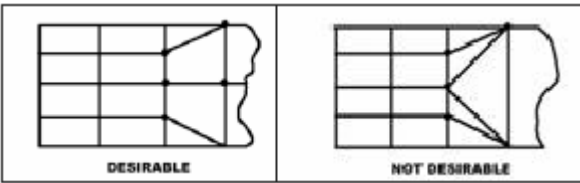
Tasarımcılar Cad modeli hazırlarken tasarımları tamamıyla bitirirler. Bunun için daha çok katı modelleme kullanırlar ve modellemeye epey zaman harcarlar. Buna karşılık analiz için daha basit yapıdaki CAD modeller yeterli olmaktadır. Çünkü katı modelle hazırlanmış bir ürünün analizi çok uzun zaman almaktadır; analiz maliyeti artmaktadır. Ayrıca yüzey ve giriş elemanlara kalınlık giydirek 3 boyutlu hacimsel geometrileri elde etmek mümkündür. Bazı bilinçli tasarımcılar analiz için uygun geometriler hazırlar. Ama çoğu tasarımcı analiz konusuna yabancı olduğundan; analizlerini katı modellerle uzatmak istemeyen çoğu tasarımcı kendi CAD modelini hazırlamak zorunda kalır.

MODELLEMEDE DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR:

- Elemanların meshi parça merkezine dik olmalı

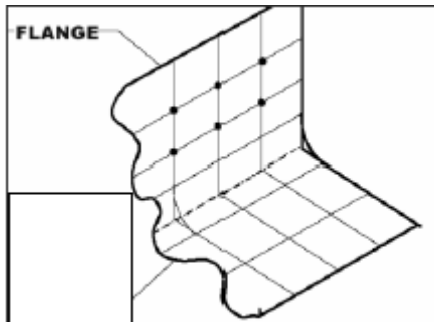


- Mesh geçişleri

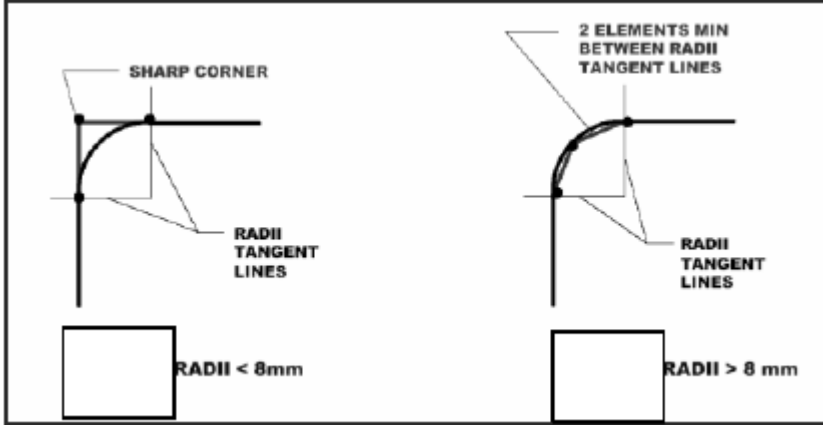


Çıkıntı Ve Kulaklar:

- Çarpma modellerinin çıkıntı ve kulakları , kulağı karşıdan karşıya geçen 3 elemanla modellenmelidir.
- Eğer kulağın genişliği 15mm'den küçük ise 2 eleman yeterli olacaktır.

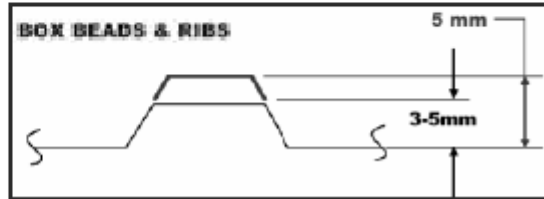
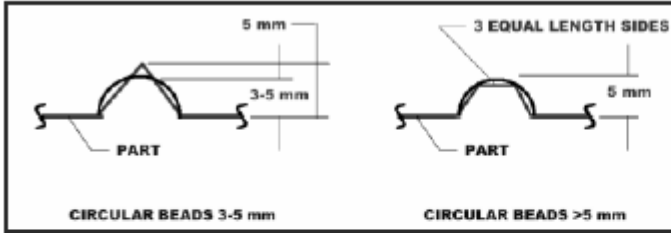


- Eğer büküm radyüsü 8mm'den küçük ise model keskin köşeli olarak bırakılabilir.
- Eğer büküm radyüsü 8mm'den büyük ise model geometrisi en az 2 eleman ve 1 node'dan oluşmalıdır.



Destek ve Federler:

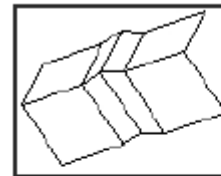
- Eğer yüksekliği 3mm'den düşük ise buna aldırı edilmez ve düz olarak modellenir.
- Eğer yüksekliği 3-5 mm arasında ise yükseklik 5mm olarak modellenir.
- Eğer yüksekliği 5mm'den fazla ise geometri 3 eşit kenar uzunluğunda mesh'lenmelidir.



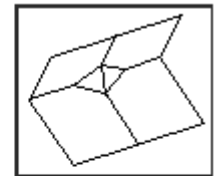
Çentikler:

- Eğer çentik 20mm'den büyük ise, çentik korunur ve genişlik boyunca en az iki elemana ayrılır.
- Eğer çentik 20mm'den küçük ise, çentik iptal edilir ve yerine 2 üçgen eleman modellenir.
- Eğer çentik 6mm'den ise, çentik iptal edilir ve yerine 6mm'den büyük 2 üçgen eleman modellenir.

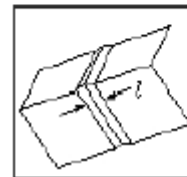
$l < 20 \text{ mm}$



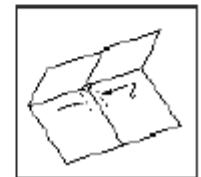
?



$l < 6 \text{ mm}$

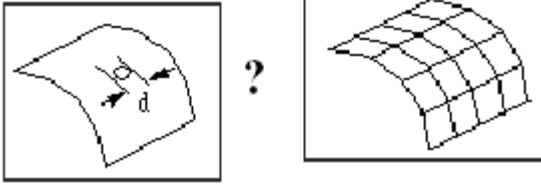


?

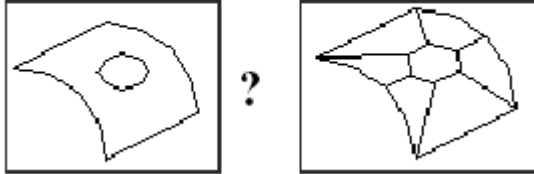


Delikler:

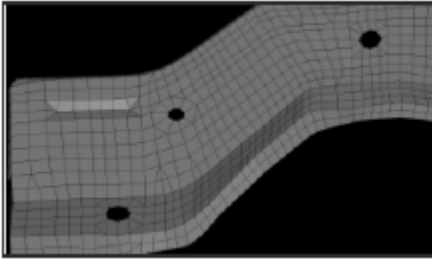
- Eğer delik çapı 10mm'den küçük ise varlığı göz ardı edilebilir.
 $d < 10 \text{ mm}$



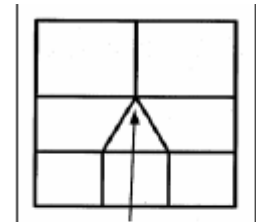
- Eğer delik çapı 10mm'den büyük ise geometride mevcut olarak korunur.
 $d > 10 \text{ mm}$



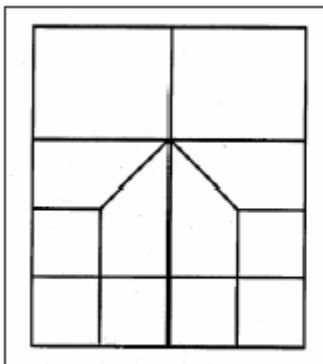
- Deliklerin mesh'lenmesinde en az 6 eleman kullanılmalıdır.

**Mesh Geçişleri:**

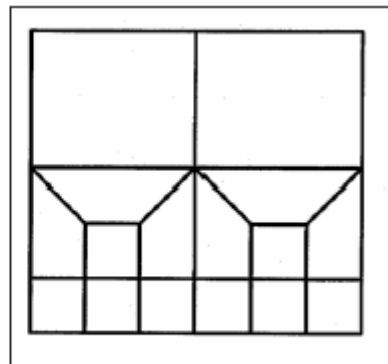
- Mesh geçişlerinde mutlaka üçgen eleman kullanılmalıdır.
- Üçgen elemanlar dörtgen elemanlara göre özellikle kaba meshlemede daha bükülmezdir.
- Üçgen elemanlar toplam elemanların %10'nun dan daha az olmalıdır.



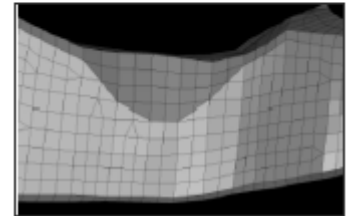
Mesh Transition



1-2 Transition

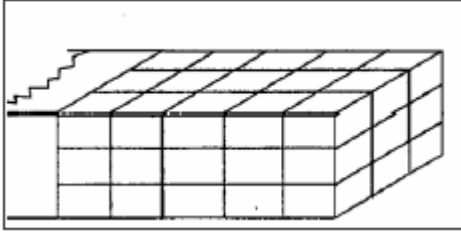


1-3 Transition

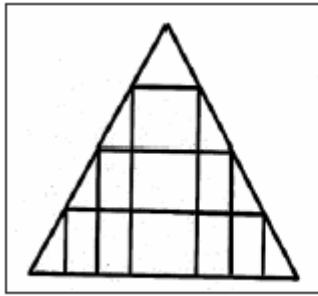


Parça kesit modellemesinde:

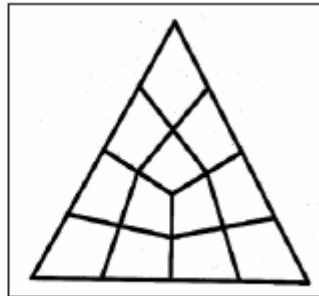
- Eğer sistem eğilmeye maruz kalacaksa model en az 3 sıralı elemana bölünmeli ve büküm kesitinde en az 5 eleman kullanılmalıdır.

**Özel Parçalarda:**

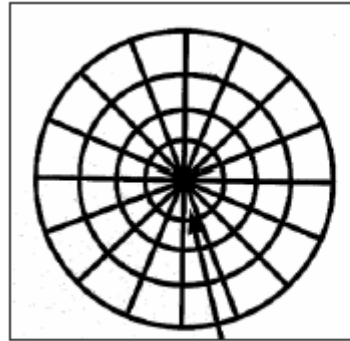
- Çok özel parçaların mesh'lenmesinde üçgen elamanlar yerine dörtgen elemanlar kullanılabilir.



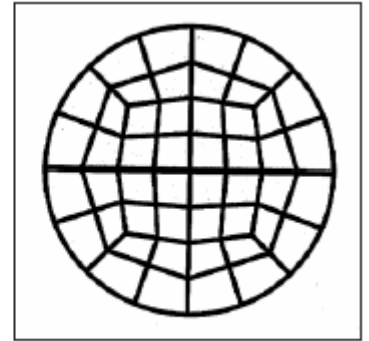
Triangular Mesh



Trapezoidal Mesh



NOT DESIRABLE



DESIRABLE

Mesh Yada Sonlu Elemanlar Ağ Modeli Ne Demektir?

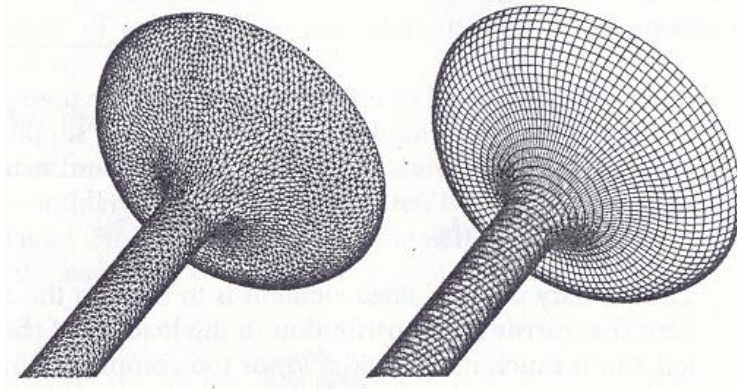
Sonlu elemanlar metodunu kullanarak yapılan bir analiz işleminde ağ oluşturma işlemi sonlu elemanlar metodunun belkemiğini oluşturur. Termal, yapısal, mekanik, akışkan ve elektromagnetik gibi mühendisliğin temel alanlarında sayısal analiz işlemleri esnasında ağ oluşturma işlemi vazgeçilmez bir adımdır. Ağ işlemi düğüm noktalarının ve elemanların koordinatlarını oluşturur. Aynı zamanda kullanıcı tarafından girilen minimum bilgiye karşılık optimum sürede otomatik olarak düğüm noktalarını ve elemanları sıralar, numaralanmasını sağlar.

h ve p Elemanları Nelerdir ?

Klasik sonlu elemanlar analizinde sonuçların doğruluğu çoğunlukla eleman sayısına bağlıdır. Eleman sayısı arttıkça sonuçlar daha gerçeğe yakın çıkar. Gerilme değişimlerinin yüksek olduğu bölgelerde eleman sayısı artırılarak elde edilen sonucun hassasiyeti de artırılır. Bu çözüm yöntemi, h-adaptivity metodu olarak tanımlanabilir. İkinci bir yöntem ise bu elemanların sayısını arttırmak yerine elemanların polinom derecesini arttırmaktır. Polinom derecesi arttıkça elde edilen modelin doğruluğu da artar. Sonuçlar kullanıcı tarafından tayin edilen tolerans içine girene kadar polinom derecesi artar. Bu tür elemanlar p elemanı olarak tanımlanır.

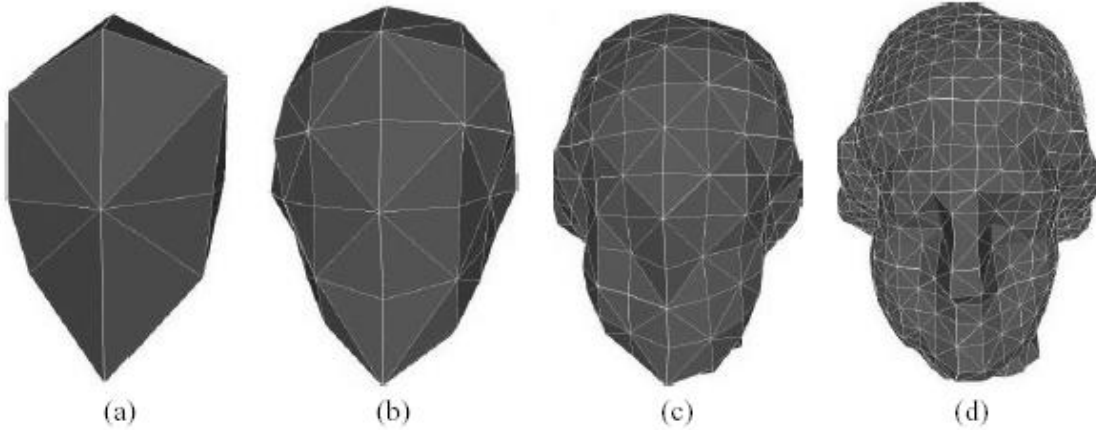
Nümerik sonuç ve bilgisayar analizi sonucu arasında mevcut olan farkın nedeni, sonlu elemanlar analizi çözümünde verilmesi gereken, eleman boyutu değerinin (mesh size) yüksek olması veya kabul edilen ayırıcı düzlem genişliği değerinin büyük olmasıdır. Sonuçlar arasındaki farkın kapatılması, daha iyi bir analiz programında, daha küçük sonlu eleman boyutu verilerek veya ayırıcı düzlemin genişliğini azaltarak sağlanabilir.

Hacimsel yapıların mesh'lenmesinde mümkün olduğu kadar küp şeklindeki elemanlar kullanılmalıdır. Aşağıda aynı valfin tetrahedon ve brick elemanlarla mesh'lenmiş hali gözükmetedir. Dörtgen veya kübik elemanlarla bir yapıyı mesh'lemek çok zahmetli veya geometrideki durum nedeniyle mümkün olmayabilir. Bu nedenle karmaşık geometrilerin mesh'lenmesinde çoğunlukla otomatik mesh seçeneği kullanılır. Otomatik mesh seçeneği ise çoğunlukla tetrahedron elemanlar kullanır.



Modelin Sonlu Elemanlara Bölünmesi (Meshing)

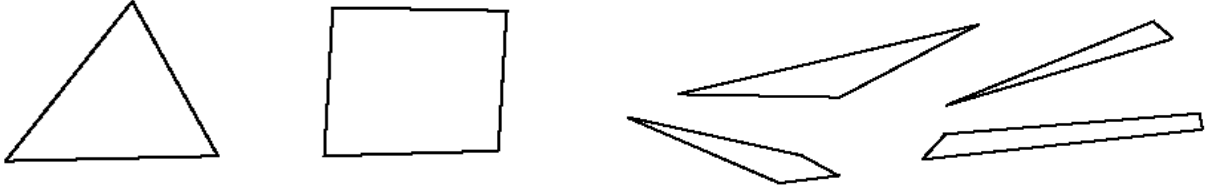
Modeli sonlu elemanlara bölmek, başlangıçta eleman seçiminin doğru yapılmasıyla birebir ilişkilidir. Yani eleman tipine göre mesh tarzı değişir. Mesh değerinin büyümesi ile yapılan analizin hassasiyeti arasında doğrudan bir orantı vardır. Ancak sonlu elemanların sayısı çok fazla olacak şekilde analiz, aynı zamanda zaman gerektiren bir olaydır. Çünkü programdan istenen, örneğin 100 adet eleman yerine 2500 eleman üzerinde analiz yapmasıdır. Yapılacak işin hassasiyetine göre bu değerler değişmektedir.



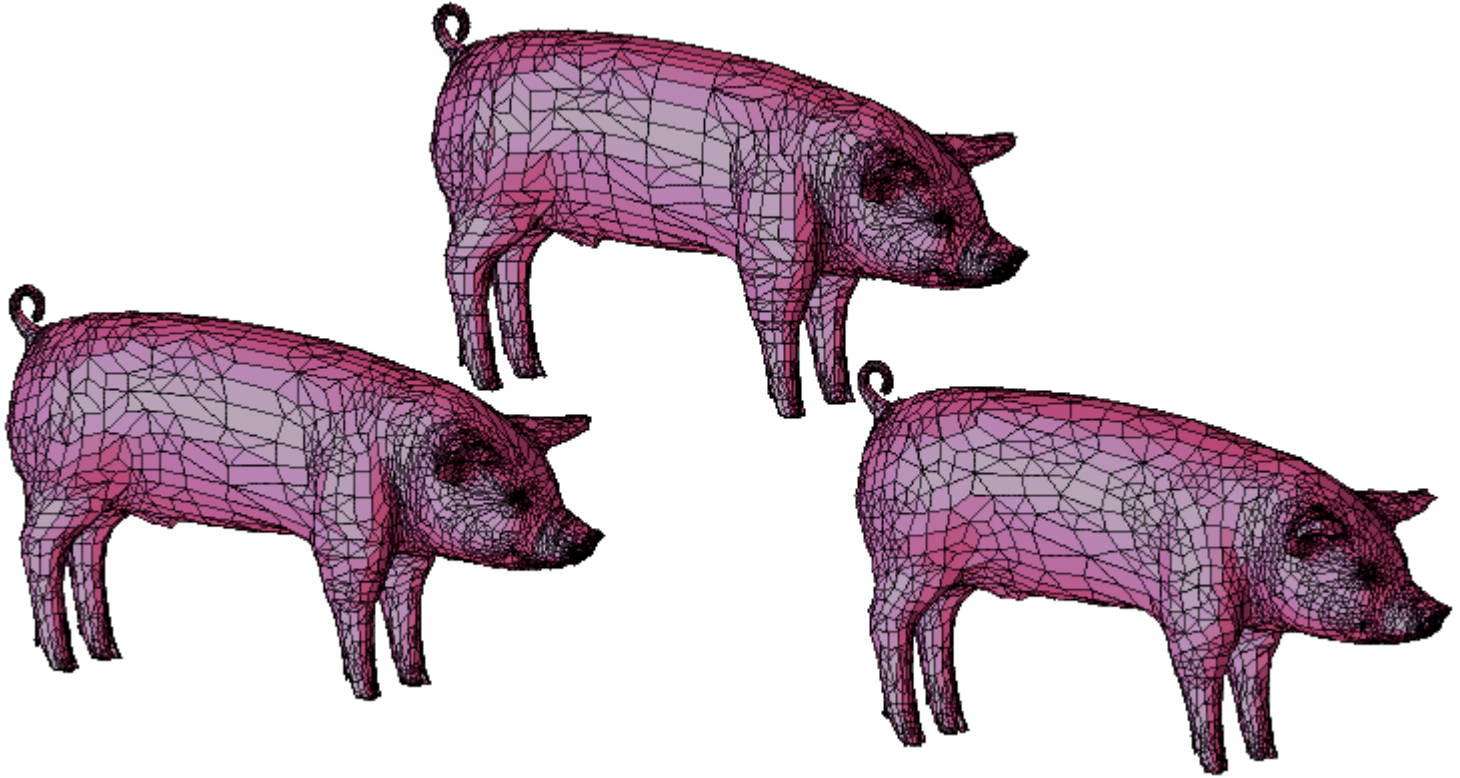
Bu metod ile yapılacak deney, düğüm noktalarından birbirine bağlı sonlu sayıda küçük elemana bölünür. Seçilen birim eleman, geometrik bir şekildir. Bunun amacı, geometrik yapısını bildiğimiz küçük elemanlar üzerinde inceleme ve çözüm yapmamızın kolay olmasıdır. Birim eleman boyunun küçülmesi, daha hassas çözüm yapmamızı sağlarken, denklem sayısını arttırdığı için işlem süresini uzatır.

Hazırlanan mesh'de elemanlar mümkün olduğu kadar düzgün geometride olmalıdır. Kenar oranları büyük, çarpık ve dar açılı elemanlardan istenmeyen kötü olarak tabir edilen elemanlardır.

Üçgen elemanlar eşkenar üçgene, dörtgen elemanlarda mümkün olduğu kadar kareye veya kareye yakın dikdörtgene benzemelidir.



Aşağıdaki şekil bir domuzun iki farklı optimizasyon yöntemi kullanılmadan önceki yüzey mesh'lemesi göstermektedir. Üstte ortadaki resim ilk mesh'lemeyi, soldaki resim node'ların orijinal noktalarının birbirine yaklaştırılması ile elde edilen artırılmış mesh kalitesini; sağdaki resim ise mesh kalitesinin mümkün olduğu kadar artırılması ile elde edilen meshlemeyi göstermektedir.



Model Meshlemeye Daha Yakın Bir Bakış (A closer look at Model Meshing)

Dikkat - Modeli nasıl mesh yaparsanız buna bağlı olarak farklı sonuçlar elde edersiniz

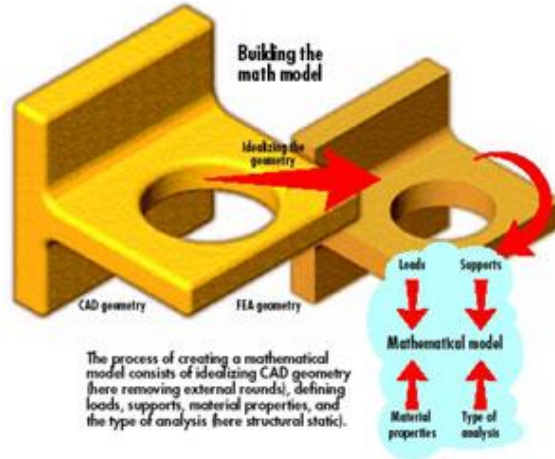
Önceleri , bir modelin sonlu elemanlar analizi için yapılandırılması işinde çok fazla zaman harcanırdı. Şu an modern CAD ve FEA programları öylesine içli dışlı çalışıyorlar ki; CAD geometrisi FEA için başlangıç noktası haline gelmiştir. Ancak CAD geometrisinin meshleme için bir FEA programına giriş yapmasından sonra ne oluyor? ve yapılan meshleme FEA sonuçlarını nasıl etkiliyor? Bu soruların cevapları sonlu elemanlar ve sonlu eleman mesh özelliklerini incelememizi ve bunların sonuçları nasıl değiştirdiğini test etmemizi gerektiriyor. Sonlu elemanlar formulasyonunda yapılan temel varsayımların analiz edilen geometri üzerindeki genel sonuçlarını gözden geçirmek de yararlı olacaktır.

Analiz için kullanılan CAD geometrisi doğru mesh edilebilir ve küçük elemanlardan oluşmalıdır. Fakat bu durum CAD geometrisinin değiştirilmesini gerektirir. Tipik değişiklikler; önemsiz detayların yok edilmesi, ince kalınlıklı yüzeyler kullanılması ve geometrinin temizlenmesi gibi işlemlerdir.

Mesh edilebilir hale getirilmiş ancak henüz meshleme yapılmamış geometrinin elde edilmesine müteakip olarak

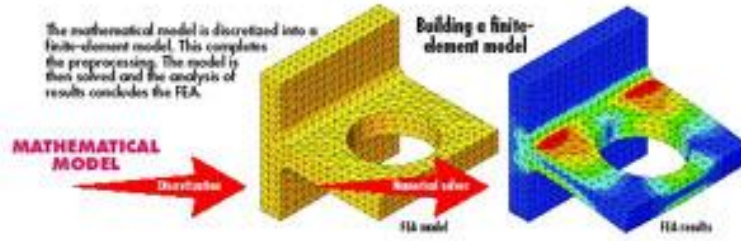
- Malzeme özellikleri
- Yükler
- Destek ve sınırlamalar
- Analiz seçimi (termal , yapısal ..vs)

gibi süreçler yer alacaktır. Bu süreç; FEA çözümlenmesinin üzerinde çalışacağı bir matematiksel model oluşturur.



Sekil.1 – Bir matematiksel modelin oluşturulma süreci CAD geometrisinin idealleştirilmesinden (dış radyüslerin yok edilmesi, destek ve yüklerin tanımlanması , malzeme özellikleri ve analiz seçimi) oluşur

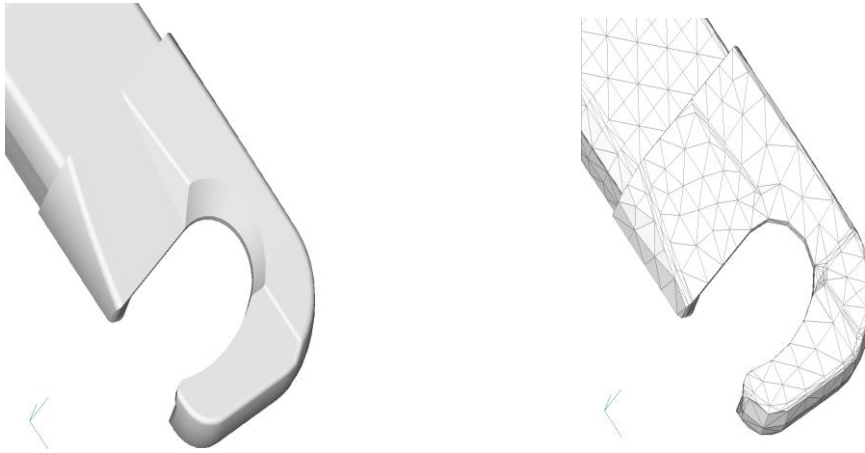
Matematiksel model bu sürecin sonunda meshleme yapılarak sonlu elemanlara dönüştürülür. Bu sırada yükler ve destekler de sonlu eleman mesh düğümlerine etki ettirilerek ayrıştırılır.



Sekil.2 – Matematik model sonlu elemanlar modeline dönüştürülür. Bu süreç işlemi tamamlar. Daha sonra model çözümlenir ve analiz sonuçları FEA 'yı sonuca bağlar.

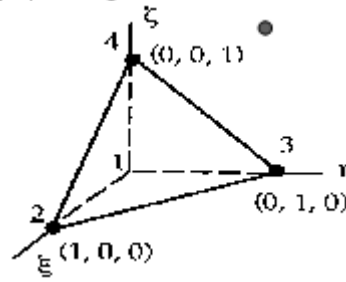
Süreklilik arz eden CAD geometrisi ve ayrık gözükten FEA geometrisi görünüşte birbirlerine benzer. Fakat CAD geometrisi katı (solid) yüzey, çizgi ve köşelerden oluşmuşken bu tür yapılar FEA geometrisinde yoktur. CAD geometrisinin hiçbir parçası FEA geometrisi haline gelmez. FEA geometrisi sadece düğümlerden oluşur. Matematiksel formülasyonlar eleman tanımlamalarını ve elemanların düğümlere bağlantılarını tanımlar. Bir mesh'i ; düğümleri birbirine bağlayan çizgiler şeklinde göstermek eleman bölgelerini gözümüzde canlandırmamıza ve CAD modeli ile FEA modelinin birbirinden ayrılmasında yaşanan karmaşıklığı azaltmaya yardımcı olur.

Meshleme işlemi sürekli geometrinin sonlu elemanlara aktarılmasıdır. Bu süreçte oluşturulan eleman tipleri mesh edilen geometri tipine, ve bazen de modellemeyi yapan kişinin seçimlerine bağlıdır. Terminolojinin açıkça belirtilemesi açısından ; "solid" (katı) "solid geometry" (katı geometri) ve "solid element" (katı eleman) gibi çeşitli anlamları vardır. Özetle ; katı CAD geometri bir FEA hacmidir ve katı eleman bu hacimlerin mesh edilmesi ile oluşur.



Sekil.3 – Katı CAD modeli (solda) ve katı FEA elemanlarından oluşan model

Katı CAD geometrisinin otomatik olarak meshlenmesi çoğunlukla tetrahedral elemanlar şeklinde olur. Bunun nedeni; günümüzdeki otomatik mesh yapıcılar kompleks geometrileri tetrahedral elemanlar dışında güvenilir bir şekilde mesh yapamamalarıdır.

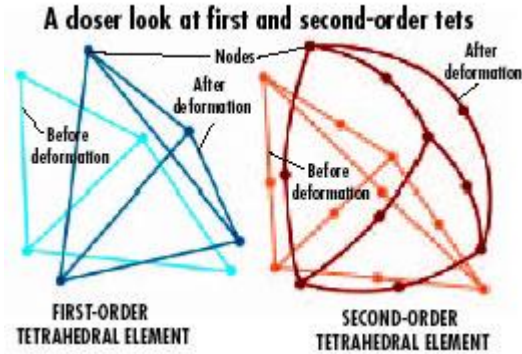


Sekil.4 - Tetrahedral eleman

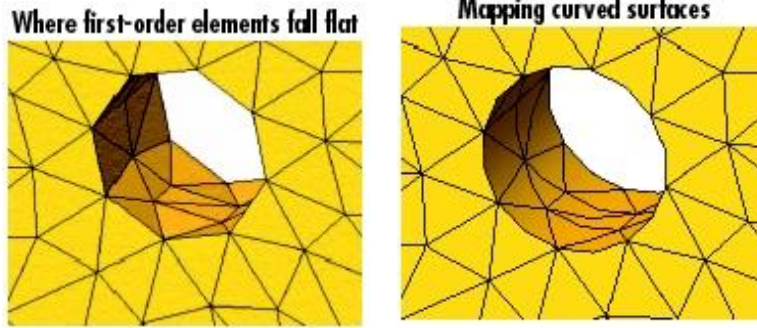
Tetrahedral katı elemanlar bir yada iki dereceli olabilirler. Bunların hangisinin kullanılacağı kullanıcıya bağlı olmakla beraber analizi yapılacak durum da belirleyici özelliktedir.

Tek dereceli (first - order) tetrahedral elemanlar 4 düğümlü , düz kenarlı ve yassı yüzeylidir. Bu yüzey ve kenarlar elemana kuvvet uygulanması sonrasında düz ve yassı kalırlar. Tek dereceli elemanlar hacimleri içinde , yüzeyleri üzerinde ve kenarları boyunca lineer yer değiştirme alanını modeller. Malzemelerin mukavemetinden hatırlayacağımız üzere; gerinim yer değiştirmenin 1.türevidir. sonuç olarak gerinim ve gerilme tek dereceli tetrahedral elemanların sabit katsayılarıdır. Bu durum tek dereceli bu elemanlardan yapılandırılmış mesh elemanlarının kompleks yapılarda gerilme dağılımlarının modellenmesinde ciddi sınırlama getirir. Daha da kötüsü ; düz kenarlı ve yassı yüzeyli bu elemanlar eğrisel geometrili yapılar için uygun değildir.

İki dereceli (second - order) tetrahedral elemanlar 10 düğüme sahiptirler ve hacimlerinde, yüzeyleri boyunca ve kenarlarında 2 dereceli yerdeğişimleri modellerler. Kenar ve yüzeyler deformasyon öncesi ve sonrası bükümlü olabilir. Bu nedenle bu elemanlar bükümlü yüzeyleri hassas bir şekilde tarayabilir. İki dereceli tetrahedral elemanlar hacimlerinde, yüzeylerinde ve kenarları boyunca olan iki dereceli (parabolik) yer değiştirme dağılımlarını modellerler. Sonuç olarak; gerinim ve gerilmelerin lineer dağılımını modellerler. Tek dereceli elemanlara kıyasla; daha çok hesaplamalara bağlı olmaları nedeniyle analizler için kullanılırlar. Gerçek yerdeğiştirme ve gerilmelerin modellenmesi için sayısal karmaşıklık ve yapılabirlik arasında bir rol oynarlar.



Sekil.5 - Deformasyon öncesi ve sonrasında tek ve iki dereceli tetrahedral elemanların gösterimi. Dikkat edeceğimiz üzere ; iki dereceli tetrahedral elemanların deforme olan yüzeyleri konkav yada konveks şekilde olabiliyor.

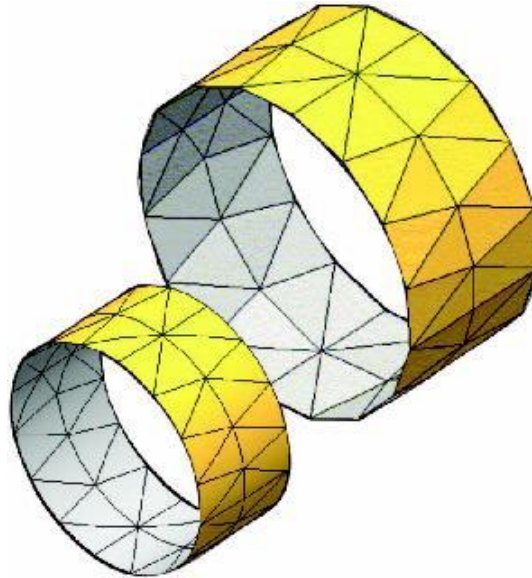


Sekil.6 – Tek dereceli tetrahedral elemanlar ile silindirik deliğin iç yüzeyi yassı elemanlar ile temsil ediliyor (solda)

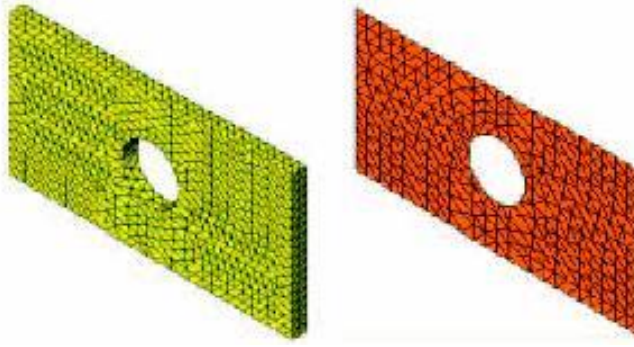
Shell elemanların oynadığı rol nedir ?

Katı tetrahedral elemanlar katı CAD geometrisinden türetilen hacimleri mesh yaparken ; ince cidarlı yapıların analizleri sırasında yüzeylerin meshlenmesi için shell elemanları kullanılmalıdır. Çünkü yüzey geometrisi kalınlık ile ilgili bir bilgi taşımaz. Solid elemanlar gibi shell elemanlarda tek ve iki derecelidir. Yine iki dereceli elemanlar analiz için önem taşır.

Belli başlı bir kısım şekiller solid yada shell eleman kullanılarak modellenebilir. Modellemede kullanılan tetrahedral shell yada solid eleman olması çoğunlukla analize bağlıdır. Geometrinin doğası meshleme için hangi tip elemanın kullanılacağını büyük ölçüde belirler. Örneğin; döküm yoluyla üretilmiş bir parça solid elemanlarla , sac metal parçalar ise shell elemanlarla mesh yapılır.



Sekil. 7 - Tek ve iki dereceli(sağda) shell elemanlarla mesh yapılmış dairesel bir geometri.



Sekil.8 – Sac geometrisi katı (solda) yada shell eleman ile modellenebilir. Asıl seçim analiz şartlarına bazen de kişisel seçimlere bağlıdır.

Element order	Triangular shell element six DOF per node	Tetrahedral solid element three DOF per node
First • Linear-displacement distribution • Constant-stress distribution		
Second • Second-order-displacement distribution • Linear-stress distribution		

Sekil .9 – Shell ve solid elemanlar ve eleman dereceleri

İyi Katı Modelleme , Kötü FEA (Good Solid Modeling , Bad FEA)

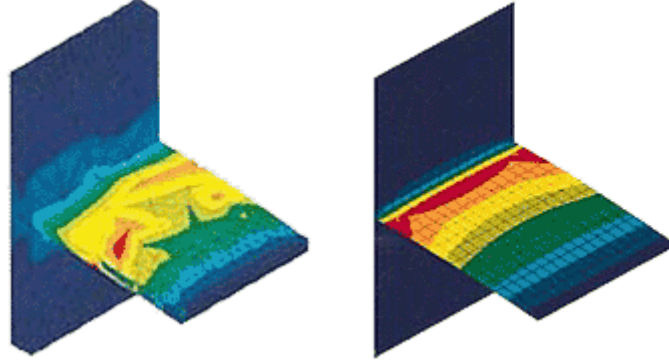
Katı modelleme fikirlerin göz önünde canlandırılması açısından çok önem arz eder , fakat sıklıkla sonlu elemanlarda yanlış uygulanmaktadır. Süre iyileştirmesine darbe vuran son yöntemlerden birisi; CAD kullanıcılarının sonlu elemanlar analizine yönelik bir temele oluşturdukları 3D modellemedir. Kusursuz bir dünyada; sonlu elemanların doğrudan bu model üzerine kurgulanması analizcilerin daha çok analizlere yoğunlaşmalarını sağlamaktadır.

Katı modelleme FEA için akıllıca bir seçimdir. Çünkü ; mesh yapma değişiklik yapmaksızın doğrudan CAD modeli üzerine kurulmaktadır. Fakat gerçek hayatta 3D CAD ile FEA arasındaki arayüz çok nadir basit yapıdadır. Katı CAD geometrisinin sonlu elemanlarda herhangi bir değişiklik gerektirmeden mesh yapma için kullanılabilir olduğu durumlar oldukça azdır. Katı CAD geometrisinin tümünün sonlu elemanlar için uygunsuz olduğu durumlar da olabilmektedir. Kusursuz bir etkileşim zaman, ilgi ve doğat kısıtları anlamayı gerektirmektedir.

Daha iyi FEA modeli oluşturmak

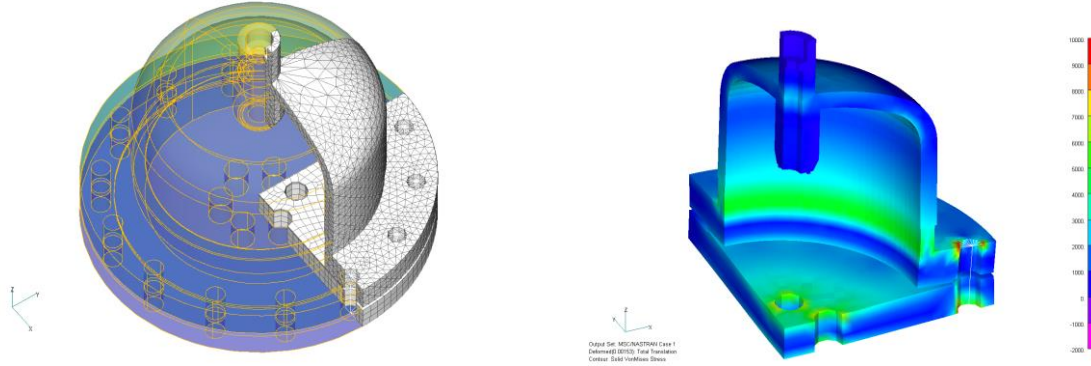
Deneyimli analizciler; CAD FEA ara yüzü kullanımlarında aşağıdaki birkaç temel bilgileri vermektedir:

- Katı (solid) elemanların doğru bir yaklaşım olup olmadığına karar vermek. Katı elemanların kullanımı çözümlene süresini arttırmaktadır. Katı elemanların aşırı büyük modeller üretmeleri durumunda ve mekanik kanunlara aykırı sonuçlar edilmesi halinde bu yaklaşımdan vazgeçilmelidir. Bu durumda shell eleman kullanmak çok daha iyi sonuç verebilir.



Sekil.10 – Solid eleman (solda) ve shell eleman kullanımı

- Yapısal önem arz etmeyen detayların yok edilmesi. Zira; önemsiz (mukavemet açısından) detaylar modeli karmaşık hale getirecektir.
- Yapısal simetriklik mümkün ise bunu kullanmak gerekir. Böylece model yapı, yük ve sınır koşullarının simetrik olması durumundan dolayı basitleştirilebilir.



Sekil.11 – Yapısal simetrik özellikteki katı model analizi

- Mesh yoğunluğunun nerede önem arz edeceğini önceden kestirebilmek. Rasgele mesh yapmak sonuçların yanlış elde edilmesine sebep olabilir.
- Aklınızdaki analize yakınsak modelleme yapın.