

DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ ANLAMA

White Paper

GENEL BAKIŞ

Bu incelemede, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz arasındaki farkları öğrenecek ve iki analiz türünün farklı durumlarda uygun olabileceğini göreceksiniz. Doğrusal olmayan etkileri göz ardı etmenin ciddi tasarım hatalarına yol açabileceğini keşfedeceğiz. Günlük tasarım uygulamalarından alınan örnekleri inceledikten sonra, doğrusal olmayan analizin abartılı tasarımdan kaçınmanıza ve daha iyi ürünler oluşturmanıza nasıl yardımcı olabileceğini göreceksiniz.

İÇİNDEKİLER

P.1

GİRİŞ

P.3

DOĞRUSAL OLMAYAN GEOMETRİ

P.4

DOĞRUSAL OLMAYAN MALZEME

P.8

ELASTİK KARARLILIK KAYBI (BÜKÜLME)

P.9

TEMAS GERİLİMLERİ VE
DOĞRUSAL OLMAYAN DESTEK

P.10

DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK ANALİZ

P.11

GÜNLÜK UYGULAMADA
DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZ

P.14

SONUÇ

GİRİŞ

Son on yıl içinde sonlu eleman analizi (FEA), yalnızca bir analist aracı olarak görülmekten çıkarak tasarım mühendisliğinin pratik dünyasına da girdi. CAD yazılımları artık entegre FEA özellikleri ile sunuluyor ve tasarım mühendisleri FEA'yı ürün tasarım sürecine destek amacıyla günlük bir tasarım aracı olarak kullanıyor.

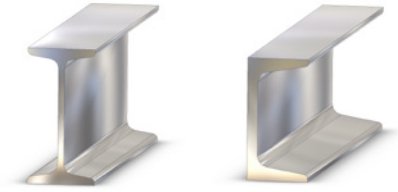
Ancak yakın zamana kadar tasarım mühendisleri tarafından gerçekleştirilen birçok FEA uygulaması doğrusal analiz ile sınırlıydı. Bu tür doğrusal analizler, tasarım mühendislerinin karşılaştığı birçok sorun için gerçek özelliklere kabul edilebilir derecede yakın bir tahmin sağlar. Yine de doğrusal olmayan yaklaşım gerektiren daha zorlayıcı sorunlar da sık sık ortaya çıkar.

Eskiden mühendisler karmaşık problem formülü oluşturma ve uzun çözüm süresi nedeniyle doğrusal olmayan analiz kullanmak istemezdi. Doğrusal olmayan FEA yazılımının CAD'e entegre edilmesi ve kullanımın çok daha kolay hale gelmesi sayesinde bu durum artık değişiyor. Ayrıca gelişmiş çözüm algoritmaları ve güçlü masaüstü bilgisayarlar da çözüm sürelerini kısaltmış durumda. Bundan on yıl önce mühendisler FEA'yı değerli bir tasarım aracı olarak görüyordu. Şimdi ise doğrusal olmayan FEA'nın avantajlarını ve tasarım sürecine sağladığı katkıları daha iyi anlamaya başladılar.

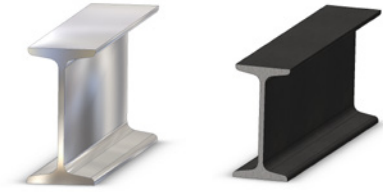
Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz arasındaki farklar

"Sertlik" terimi doğrusal ve doğrusal olmayan analiz arasındaki en temel farkı tanımlar. Sertlik, bir parça ya da montajın uygulanan yüke verdiği tepkiyi karakterize eden bir özelliktir. Sertliği etkileyen birkaç faktör mevcuttur:

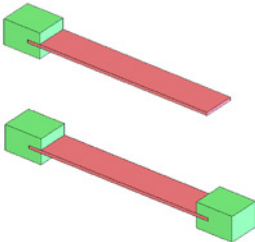
1. Şekil: L kirişin sertliği kanallı kirişten farklıdır.



2. Malzeme: Demir kiriş, aynı boyuttaki çelik kirişe göre daha az serttir.



3. Parça Desteği: Şekil 1'de görüldüğü gibi basit desteğe sahip bir kiriş, entegre destekleri olan aynı kirişe göre daha az serttir ve daha fazla sapar.



Şekil 1: Konsol kiriş (üstte) her iki uçtan desteklenen aynı kirişe (altta) göre daha az serttir.

"Sertlik" terimi doğrusal ve doğrusal olmayan analiz arasındaki en temel farkı tanımlar. Sertlik, bir parça ya da montajın uygulanan yüke verdiği tepkiyi karakterize eden bir özelliktir. Sertliği etkileyen üç temel faktör bulunur: şekil, malzeme ve parça desteği.

Bir yapı yük altında deforme olduğunda, yukarıdaki faktörlerden biri veya daha fazlası nedeniyle sertliği değişir. Çok fazla deforme olursa şekli değişebilir. Malzeme, kırılma limitine ulaşırsa malzeme özellikleri değişir.

Diğer taraftan, sertlikteki değişiklik yeterince küçükse deformasyon sürecinde şeklin de malzeme özelliklerinin de hiç değişmediğini varsaymak mantıklı olur. Bu varsayım, doğrusal analizin temel ilkesidir.

Tüm deformasyon süreci boyunca, analiz edilen modelin yük binmeden önce deforme olmamış şekildedeyken sahip olduğu sertliği koruduğu anlamına gelir. Model ne kadar deforme olursa olsun (yük ister tek bir adımda ister adım adım uygulanmış olsun) ve yüke karşılık oluşan gerilimler ne kadar yüksek olursa olsun model ilk sertliğini korur.

Bu varsayım, problem formülasyonu ve çözümünü büyük ölçüde basitleştirir. Temel FEA denklemini hatırlayalım:

$$[F] = [K] * [d]$$

Burada: **[F] nodal yüklerin bilinen vektörüdür**
[K] bilinen sertlik matrisidir
[d] nodal yer değiştirmelerin bilinmeyen vektörüdür

Bu matris denklemi, FEA modellerinin davranışını açıklar. Model büyüklüğüne bağlı olarak birkaç binden birkaç milyona kadar değişen çok sayıda doğrusal cebir denklemi içerir. Sertlik matrisi [K] geometriye, malzeme özelliklerine ve kısıtlamalara bağlıdır. Model sertliğinin hiçbir zaman değişmediğine dair doğrusal analiz varsayımı kullanıldığında bu denklemler yalnızca bir kez kurulup çözülür, model deforme olurken hiçbir şeyin güncellenmesi gerekmez. Dolayısıyla doğrusal analizde problem formülasyonundan tamamlamaya kadar düz bir yol izlenir. Doğrusal analiz, çok büyük modeller için bile birkaç saniye ile birkaç dakika içinde sonuç üretir.

Doğrusal olmayan analiz dünyasına adım atıldığında ise her şey değişir çünkü doğrusal olmayan analiz, mühendislerin sabit sertlik varsayımını terk etmelerini gerektirir. Bunun yerine, deformasyon sürecinde sertlik değişir ve doğrusal olmayan çözücü, tekrarlanan çözüm sürecinde ilerlerken sertlik matrisinin [K] güncellenmesi gerekir. Bu tekrarlamalar, doğru sonuçlar elde etmek için gereken süreyi uzatır.

Sertlikteki değişiklik yeterince küçükse deformasyon sürecinde şeklin de malzeme özelliklerinin de hiç değişmediğini varsaymak mantıklı olur. Bu varsayım, doğrusal analizin temel ilkesidir.

FARKLI DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ TÜRLERİNİ ANLAMA

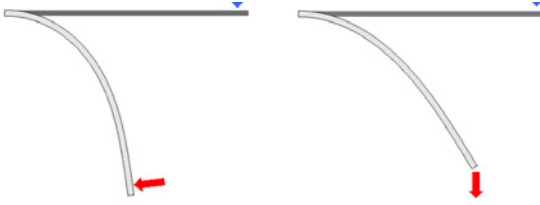
Değişen sertlik süreci tüm doğrusal olmayan analiz türlerinde ortak olsa da doğrusal olmayan davranışın kökeni farklı olabilir, bu da doğrusal olmayan analizleri doğrusal olmama durumunun asıl kökenine dayalı olarak sınıflandırmayı mantıklı kılar. Birçok problemde doğrusal olmayan davranışın tek bir nedenini belirlemek mümkün olmadığından bazı analizlerde birden fazla doğrusal olmama türünü hesaba katmak gerekebilir.

Doğrusal olmayan geometri

Daha önce de değinildiği gibi, parçanın sertliği çalışma koşullarında değişiyorsa doğrusal olmayan analiz gerekli hale gelir. Sertlik değişiklikleri yalnızca şekil değişimlerinden kaynaklanıyorsa doğrusal olmayan davranış, geometrik doğrusal olmama olarak tanımlanır.

Bu tür şekle bağlı sertlik değişiklikleri, parçada çıplak gözle görülebilir büyük deformasyonlar olduğunda oluşabilir. Genel kabul gören yaygın bir kurala göre, deformasyonlar parçanın en büyük ölçümlendirmesinin 1/20'sinden büyük ise doğrusal olmayan geometri analizi yapılmalıdır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli faktör ise büyük deformasyonlar olduğunda model deforme olurken yük yönünün de değişebileceğidir. Birçok FEA programı bu yön değişikliğini hesaba katmak için iki seçenek önerir: takipçi yükler veya takipçi olmayan yükler.

Takipçi yük, Şekil 2'te gösterildiği gibi deforme olan modele göre yönünü korur. Takipçi olmayan yük ise ilk yönünü korur.

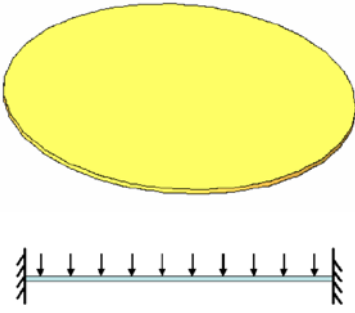


Şekil 2: Takipçi veya korunumlu olmayan yük, deformasyon sürecinde yönünü değiştirir ve deforme olan kirişin normunu takip eder (solda). Takipçi olmayan veya korunumlu yük ise orijinal yönünü korur (sağda).

Genel kabul gören yaygın bir kurala göre, deformasyonlar parçanın en büyük ölçümlendirmesinin 1/20'sinden büyük ise doğrusal olmayan geometri analizi yapılmalıdır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli faktör ise büyük deformasyonlar olduğunda model deforme olurken yük yönünün de değişebileceğidir.

Çok yüksek bir basınca maruz bırakılan basınçlı bir kabın çok fazla şekil değişimi yaşaması, ikinci duruma bir diğer iyi örnektir. Basınç yükü her zaman basınçlı kabın duvarlarının normunu takip eder. Bu senaryonun doğrusal analizi kabın şeklinin değişmediğini varsaysa da basınçlı kabın gerçekçi analizi, korunumlu olmayan (veya takipçi) yük ile geometrik doğrusal olmama analizi yapılmasını gerektirir.

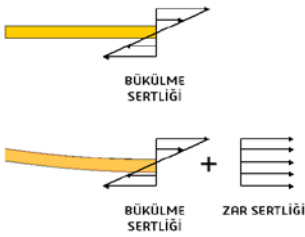
Şekil kaynaklı sertlik değişiklikleri deformasyonlar küçük olduğunda da oluşabilir. Bunun tipik bir örneği, başlangıçta düz olan ve basınç altında sapan bir zardır (Şekil 3'e bakın).



Şekil 3: Basınç yükü altındaki düz bir zarın analiz edilmesi, deformasyonun boyutu çok küçük olsa bile doğrusal olmayan geometri analizi gerektirir.

İlk başta zar yalnızca bükülme sertliği ile basınç yüküne direnir. Basınç yükü bir miktar eğriliğe yol açtıktan sonra deforme olan zar, orijinal bükülme sertliğine ilaveten sertlik gösterir (Şekil 4). Deformasyon zar sertliğini değiştirerek deforme olan zarın düz zardan çok daha sert olmasına yol açar.

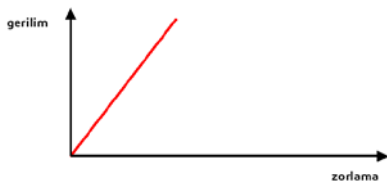
Bazı FEA programları daha kafa karıştırıcı bir terminoloji kullanarak tüm geometrik doğrusal olmama analizlerini "büyük deformasyon analizi" olarak adlandırır. Bu, daha küçük deformasyon için doğrusal olmama analizi gerçekleştirme ihtiyacını göz ardı eder.



Şekil 4: Düz bir zar yükü yalnızca bükülme sertliği ile yanıt verir. Deformasyon nedeniyle aynı zamanda zar sertliği kazanır. Dolayısıyla, doğrusal analiz ile tahmin edilenden daha serttir.

Doğrusal olmayan malzeme

Sertlik değişiklikleri yalnızca çalışma koşulları altında malzeme özelliklerindeki değişikliklerden kaynaklanıyorsa burada sorun malzemenin doğrusal olmamasıdır. Doğrusal malzeme modelinde gerilimin zorlama ile orantılı olduğu varsayılır (aşağıdaki Şekil 5). Yani uygulanan yük ne kadar yüksek olursa gerilimlerin ve deformasyonun da yükteki değişiklikler ile orantılı olarak o kadar yüksek olacağı varsayılır. Ayrıca hiçbir kalıcı deformasyon olmayacağı ve yük kaldırıldığında modelin her zaman orijinal şekline geri döneceği varsayılır.



Şekil 5

Şekil kaynaklı sertlik değişiklikleri deformasyonlar küçük olduğunda da oluşabilir. Bunun tipik bir örneği, başlangıçta düz olan ve basınç altında sapan bir zardır. İlk başta zar yalnızca bükülme sertliği ile basınç yüküne direnir. Basınç yükü bir miktar eğriliğe yol açtıktan sonra deforme olan zar, orijinal bükülme sertliğine ilaveten sertlik gösterir.

Bu basite indirgeme kabul edilebilir olsa da çoğu plastikte olduğu gibi yükler bir miktar kalıcı deformasyona yol açabilecek kadar yüksek olduğunda veya kauçuk ve elastomerlerde olduğu gibi zorlamalar çok yüksek olduğunda (bazen yüzde elliden yüksek) doğrusal olmayan malzeme modeli kullanılması gerekir.

Çeşitli malzeme türlerinin çalışma koşulları altında davranış biçimlerindeki büyük farklılıklar nedeniyle FEA programları, bu davranışları simüle etmek için özelleştirilmiş teknikler ve malzeme modelleri geliştirmiştir. Aşağıdaki tabloda, hangi problem için hangi malzeme modellerinin en iyi olduğuna dair kısa bir inceleme sunulmuştur.

MALZEME

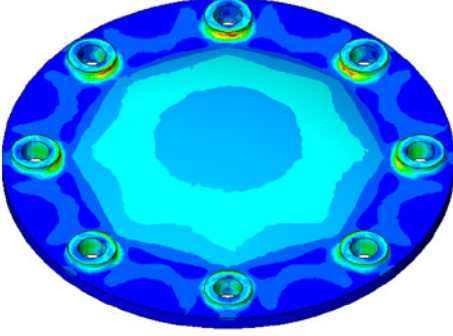
SINIFLANDIRMA	MODEL	AÇIKLAMALAR
Elastoplastik	Von Mises veya Tresca	Bu modeller, zorlanma-gerilim eğrisinin nihai gerilime ulaşmadan önce bir "platoya" ulaştığı malzemeler için iyi sonuç verir. Çoğu mühendislik metali ve bazı plastikler bu malzeme modelinin özelliklerini taşır.
	Drucker-Prager	Bu model topraklar veya tanecikli malzemeler için iyi sonuç verir.
Hiperelastik	Mooney-Rivlin ve Ogden	Kauçuk gibi, sıkıştırılamayan elastomerler için iyi sonuç verir.
	Blatz-Ko	Bu model sıkıştırılabilir poliüretan köpük kauçuklar için iyi sonuç verir.
Viskoelastik	Çeşitli (diğer modeller ile opsiyonel)	Bu model sert kauçuk veya cam için iyi sonuç verir.
Yorulma	Çeşitli (diğer modeller ile opsiyonel)	Yorulma, sabit stres altında oluşan zamana bağlı bir zorlanmadır. Yorulma, özellikle yüksek sıcaklıklardaki metaller, yüksek polimerli plastikler, beton ve roket motorlarındaki katı yakıt gibi birçok mühendislik malzemesinde gözlemlenir.
Süper elastik (Şekil hafızalı alaşımlar)	Nitinol	Nitinol gibi şekil hafızalı alaşımlar (SMA) süper elastik etkisi sağlar. Bu malzeme yükleme-yük boşaltma döngülerinde kalıcı deformasyon göstermeksizin büyük deformasyonlar geçirir.



Şekil 6: Tam elastik plastik bir malzeme modelinin gerilim-zorlanma eğrisi. Bu malzeme modeline göre maksimum gerilim boyutu plastik gerilimi (akma gerilimi) limitini aşamaz.

Tam elastik plastik malzeme modeli (deformasyon sonrasında orijinal şekline geri dönme kabiliyetini kaybetmiş olan malzeme) analizi yaparken gerilim belirli bir zorlanma değerinin üzerinde sabit kalır. Sekiz civata ile yerine sıkıca sabitlenmiş bir bölmenin dökme demir malzemesini açıklar.

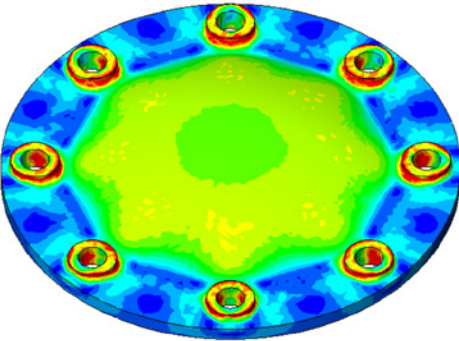
Doğrusal analiz, 206 MPa (30.000 psi) malzeme akma gerilimine kıyasla maksimum von Mises geriliminin 614 MPa (89.600 psi) olduğunu gösterir. Bu doğrusal analizin sonuçları Şekil 7'de gösterilmiştir.



Tam elastik plastik malzeme modeli (deformasyon sonrasında orijinal şekline geri dönme kabiliyetini kaybetmiş olan malzeme) analizi yaparken gerilim belirli bir zorlanma değerinin üzerinde sabit kalır.

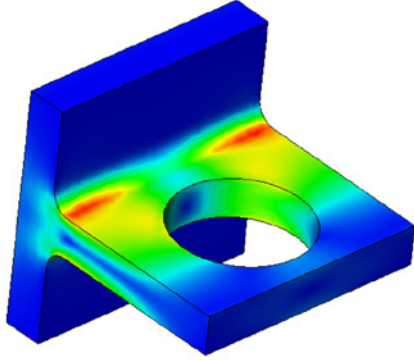
Şekil 7: Bir bölmenin doğrusal gerilim çözümü çok yüksek ve yerleştirilmiş gerilim konsantrasyonları olduğunu gösteriyor.

Gerilimler akma gerilimlerini aşarsa bölme parçalara ayrılır mı? Bunu öğrenmek için ne kadar malzemenin plastiğe döneceğini incelemek üzere bir elastoplastik malzeme modelinin kullanılması gerekir. Şekil 8'da maksimum gerilimin akma gerilimine eşit olduğu doğrusal olmayan çözüm gösterilmiştir. Plastik bölgeler hala yereldir ve bu, bölmenin ayrılmayacağını gösterir. Elbette bu tasarımın kabul edilebilir olup olmadığını belirlemek için dikkatli mühendislik muhakemesi gerekir.



Şekil 8: Tam elastik plastik malzeme modeli ile elde edilmiş doğrusal olmayan gerilim çözümü. Kırmızı bölgeler plastiğe dönen malzemeleri gösterir. Plastik bölgelerin kapsamı yereldir.

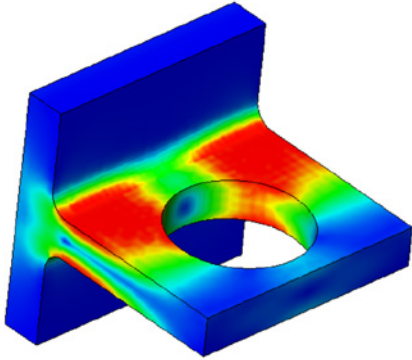
Şekil 9'da bir alüminyum braketin doğrusal gerilim çözümü gösterilmiştir. Maksimum gerilim 44 MPa (6400 psi) olarak okunmaktadır ve malzeme akma geriliminin 28 MPa (4100 psi) olduğu göz ardı edilmiştir.



Gerilimler akma gerilimlerini aşarsa bölme parçalara ayrılır mı? Bunu öğrenmek için ne kadar malzemenin plastiğe döneceğini incelemek üzere bir elastoplastik malzeme modelinin kullanılması gerekir. Plastik bölgeler hala yereldir ve bu, bölmenin ayrılmayacağını gösterir.

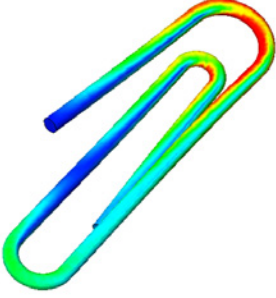
Şekil 9: İçi boş bir braketin doğrusal gerilim çözümü gerilimin malzeme akma gerilimi limitinin çok üzerinde olduğunu göstermektedir.

Doğrusal olmayan malzeme analizi, maksimum gerilim 28 MPa (4100 psi) değerindeyken malzemenin aktığı durumlarda bu sonuçları hesaba katabilir (Şekil 10). Doğrusal olmayan gerilim sonuçları braketin ayrılmak üzere olduğunu gösterir. Plastik bölgeler konsolun kesitinin neredeyse tamamını kaplar ve yük miktarında çok az bir artış bu kesitin tamamen plastiğe dönmesine ve braketin ayrılmasına neden olan bir plastik menteşe geliştirmesine neden olur.

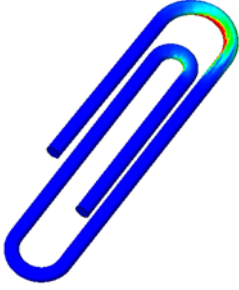


Şekil 10: Doğrusal olmayan gerilim çözümü maksimum gerilimin akma geriliminden daha yüksek olmadığını gösterir. Plastik bölgelerin kapsamı braketin bir plastik menteşe oluşturmaya çok yakın olduğunu gösterir. Yük taşıma kapasitesinin sınırındadır.

Sıradan bir çelik ataşı alarak "kivrımlı kısımlarını açma" ve sonra tekrar "kivırma" işleminin modelini oluşturmak için hem doğrusal malzeme hem de doğrusal olmayan geometri dikkate alınmalıdır. Şekil 11'de tam elastik plastik malzeme modeli kullanılarak ataşın deforme olmuş şekli gösterilmiştir. Şekil 12'te ataş orijinal şekline geri kıvrıldığında oluşan artık gerilimler gösterilmiştir.



Şekil 11: Ataşın kıvrılmasının analizi için doğrusal olmayan malzeme ve doğrusal olmayan geometri analizi gerekir. "Kivrımlı kısımları açılmış" konumdaki ataş, plastik gerilimlerini gösterir



Şekil 12: Orijinal şekline geri kıvrılan ataş, artık gerilimleri gösterir.

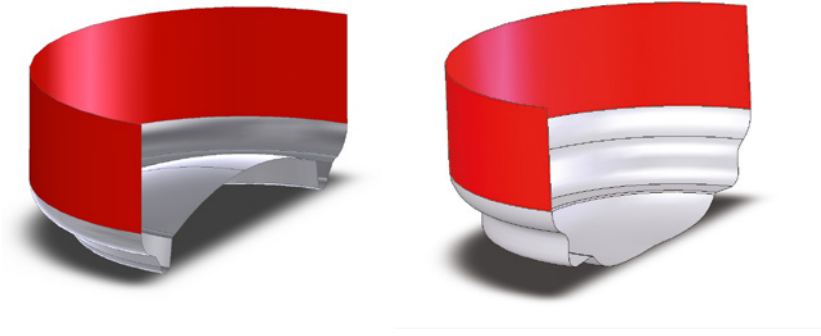
Elastik kararlılık kaybı (bükülme)

Uygulanan yükler nedeniyle bir parçanın sertliği de değişir. Bazen yükler (ne şekilde uygulandıklarına bağlı olarak) sertliği artırabilir (germe yükleri) veya azaltabilir (sıkıştırma yükleri). Örneğin gergin bir ip bir akrobatın ağırlığını taşıyabilir. Gevşek bir ip ise düşmesine neden olur. Sıkıştırıcı yük söz konusu olduğunda, sertlik değişiklikleri yapının sertliğinin sıfıra düşmesine yol açmaya yeterli ise bükülme oluşur ve yapı hızlı bir deformasyon yaşar. Ardından ya ayrılır ya da bükülme sonrası durumunda yeni bir sertlik kazanır.

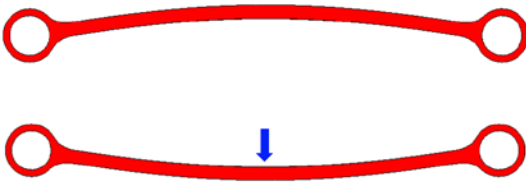
Doğrusal bükülme analizi bir yapının hangi yük altında büküleceğini (Euler yükü) hesaplamak için de kullanılabilir. Ancak doğrusal bükülme analizinin sonuçları korunumlu değildir. Ayrıca, FEA modelindeki idealleştirmeler, tahmin edilen bükülme yükünün FEA modeli için gerçek parçaya göre çok daha yüksek olmasına yol açabilir. Dolayısıyla, doğrusal bükülme analizinin sonuçları dikkatli kullanılmalıdır.

Bükülme, her durumda felakete neden olan bir hata değildir ve yapı, bükülme olduktan sonra da yükü desteklemeye devam edebilir. Doğrusal olmayan analiz bükülme sonrası davranışı açıklar.

Şekil 13 ve 14'te bir yakalama etkisi gösterilmiştir. Parça, bükülme gerçekleşikten sonra bile yük taşıma özelliklerini korur.



Şekil 13



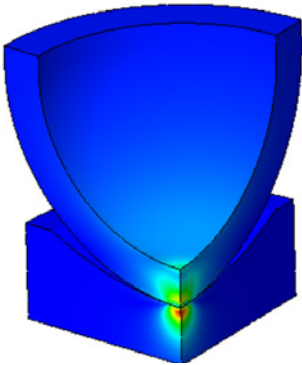
Şekil 14: Yakalama etkisinin analiz edilmesi doğrusal olmayan analiz gerektirir.

Temas gerilimleri ve doğrusal olmayan destek

Çalışma yüklerinin uygulanması sırasında temaslar dahil destek koşulları değişiyorsa doğrusal olmayan analiz gereklidir.

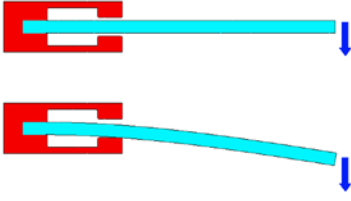
Temas eden iki yüzey arasında temas gerilimleri gelişir. Dolayısıyla, temas alanı ve temas bölgesinin sertliği çözümden önce bilinmez. Şekil 15'te tipik bir temas probleminin gerilim çözümü gösterilmiştir. Temas gerilimi alanı genel model büyüklüğüne göre çok küçük olsa da temas bölgesinin değişen sertliği doğrusal olmayan analiz yapılmasını gerektirir.

Çalışma yüklerinin uygulanması sırasında temaslar dahil destek koşulları değişiyorsa doğrusal olmayan analiz gereklidir.



Şekil 15: İki küre arasında gelişen gerilimleri modelleyen temas gerilimi analizi (temas eden iki parçadan yalnızca biri gösterilmiştir) doğrusal olmayan destekler ile analiz kategorisine girer.

Şekil 16'da doğrusal olmayan desteklere bir örnek gösterilmiştir. Etkili kiriş uzunluğu ve bunun sonucunda oluşan gerilim, kiriş deformasyonuna bağlıdır. Kiriş, destek ile temas ettiğinde etkin uzunluğun azalması nedeniyle sertliği artar.



Şekil 16: Bu destek (etkinleştirildiğinde) kirişin etkin uzunluğunu değiştirir. Bunun sonucunda, kiriş sertliği değişir ve problem için doğrusal olmayan analiz yapılması gerekir.

Doğrusal olmayan dinamik analiz

Dinamik analiz atalet etkilerini, sönümlemeyi ve zamana bağlı yükleri hesaba katar. Düşürme testi, motor yatağı titreşimleri, hava yastığı açılması veya çarpma simülasyonu gibi işlemlerin tümü için dinamik analiz gerekir. Peki, dinamik analiz doğrusal mıdır, değil midir? Ayırt edici kurallar, statik analiz ile aynıdır.

Model sertliği uygulanan yük altında belirgin ölçüde değişmiyorsa doğrusal dinamik analizleri yeterli olur. Titreşimli bir motor yatağı veya diyapozon, denge noktasında küçük deformasyonlar yaşar ve bu nedenle doğrusal dinamik analizi ile analiz edilebilir.

Çarpma simülasyonu, hava yastığı açılması analizi veya bir metal pres sürecinin modellenmesi gibi problemler, hem büyük deformasyonların (doğrusal olmayan geometri) hem de büyük zorlanmaların (doğrusal olmayan malzeme) oluşması nedeniyle doğrusal olmayan dinamik analiz gerektirir.

Doğrusal olmayan analiz daha iyi ürünler oluşturmaya nasıl yardımcı olur?

Doğa doğrusal değildir. Doğrusal analiz, parça ve montajların gerçek doğrusal olmayan davranışının yalnızca yaklaşık bir tahminini verebilir. Çoğu durumda bu tür bir yakın tahmin kabul edilebilir ve doğrusal analiz ürün özellikleri hakkında değerli fikirler sağlayabilir. Ancak birçok durumda doğrusal varsayımlar gerçeklikten çok farklıdır ve basit ya da yanıltıcı bilgiler sağlar.

Bir parçanın çalışma yükleri altında kırılıp kırılmayacağına karar vermek için doğrusal analiz sonuçlarının kullanılması abartılı tasarıma yol açabilir. Örneğin, yalnızca doğrusal analiz ile analiz edilen bir braket tasarımı, tasarımcıyı gerilimin akma gerilimini aşmaması gerekliliğine bağlı kalmak durumunda bırakır. Ancak doğrusal olmayan analiz bir miktar akmanın kabul edilebilir olduğunu gösterebilir. Bu durumda, kullanılan malzeme miktarından tasarruf etmek veya yapısal bütünlüğü tehlikeye atmadan daha düşük maliyetli bir malzeme seçmek mümkün hale gelir. Örneğin bir mühendis doğrusal analiz ile test edilen düz bir panelin sapmasının çok büyük olmasından endişe ederek bu sapmayı telafi etmek için abartılı bir tasarım yapabilir ama aslında doğrusal analizin deformasyonları abartılı gösterdiğini ve aslında orijinal tasarımın yeterli olduğunu fark etmeyebilir.

Ancak birçok durumda doğrusal varsayımlar gerçeklikten çok farklıdır ve basit ya da yanıltıcı bilgiler sağlar. Bir parçanın çalışma yükleri altında kırılıp kırılmayacağına karar vermek için doğrusal analiz sonuçlarının kullanılması abartılı tasarıma yol açabilir.

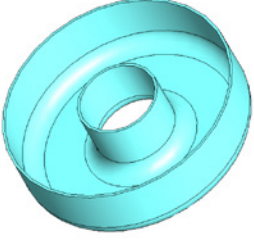
Günlük uygulamada doğrusal olmayan analiz

Bir mühendis doğrusal olmayan problemleri fark edebilecek kadar deneyim kazandığında bu teknolojinin kullanımının uç durumlar ile sınırlı olmadığı belirgin hale gelir. Doğrusal olmayan analiz gerektiren veya bu analizden yararlanılabilecek tasarımlar tüm endüstrilerde ve genel tasarım uygulamalarında çok yaygındır.

Doğru tasarım kararı için doğrusal olmayan analiz gereken birçok ürün örneği aşağıda verilmiştir. Bu problemlerin birçoğu birden fazla türde doğrusal olmayan davranış içermektedir.

Avara kasnağı (Şekil 17)

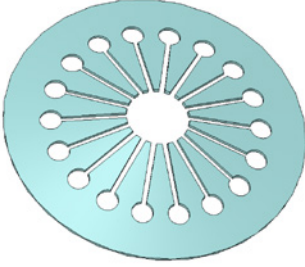
Bu preslenmiş çelik makara aşırı gerilimler geliştirmeden önce kayış gerilimi altında bükülebilir. Bükülme yükünü belirlemek için doğrusal bükülme analizi yeterli olsa da bükülme sonrası davranışı incelemek için doğrusal olmayan analiz gerekir.



Şekil 17

Diyafram yayı (Şekil 18)

Doğrusal olmayan yay özelliği, zar etkilerinin hesaba katılması için doğrusal olmayan geometri analizi yapılmasını gerektirir.



Şekil 18

Devrilme korumalı yapı (Şekil 19)

Devrilme halinde yapı akma geriliminin ötesinde deforme olur ve devrilme enerjisini absorbe eder. Bu süreçte büyük deformasyona uğrar. Devrilmenin etkilerini anlamak için doğrusal olmayan malzeme ve doğrusal olmayan geometri analizinin bir arada kullanılması gerekir.



Şekil 19

Yumuşak obstetrik forseps (Şekil 20)

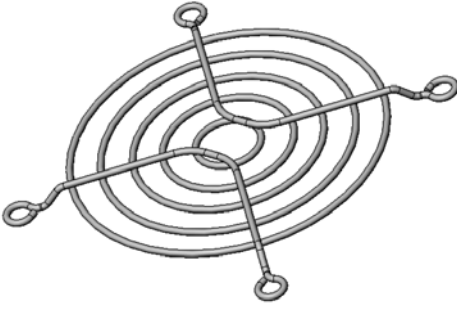
Yumuşak obstetrik forsepsler, forseps kullanılan doğumlarda bebeğin başının etrafını "kalıp gibi sarmak" için kullanılır. Çok yüksek çekiş ve/veya sıkıştırma uygulanması halinde forsepsler yaralanmaları engellemek için bebeğin başından kayacak şekilde tasarlanır. Bu forsepslerin analizinde büyük deformasyonların ve doğrusal olmayan elastik malzemenin hesaba katılması için doğrusal olmayan malzeme ve doğrusal olmayan geometri bir arada kullanılmalıdır.



Şekil 20

Fan muhafazası (Şekil 21)

Bu parça, deformasyon sürecinde gelişen zar gerilimleri nedeniyle doğrusal olmayan geometri uygulanmasını gerektirir. Doğrusal olmayan malzeme analizi de gerekebilir.



Şekil 21

Geçme halkası (Şekil 22)

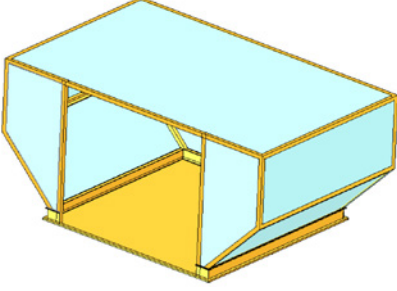
Büyük deformasyonlar nedeniyle doğrusal olmayan geometri analizi gereklidir. Bu halka için doğrusal olmayan malzeme analizi de gerekli olabilir.



Şekil 22

Uçak bagajı konteyneri (Şekil 23)

Bu uçak bagajı konteyneri için mavi Lexan® panellerdeki zar etkileri nedeniyle doğrusal olmayan geometri analizi gerekir. Ayrıca çerçeve için de bükülme veya bükülme sonrası analizi yapılması gerekir.



Şekil 23

Ofis sandalyesi (Şekil 24)

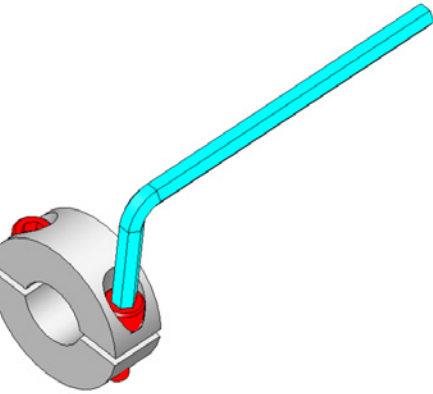
Bu örnekte, çerçevedeki büyük deformasyonlar doğrusal olmayan geometri analizi gerektirebilir. Oturma ve sırt kısmı için doğrusal olmayan geometri ve doğrusal olmayan malzeme analizi gerekir.



Şekil 24

Alıyan anahtarı (Şekil 25)

Anahtar ile soket vidası arasındaki temas, temas gerilimi analizi gerektirir.



Şekil 25

SONUÇ

Karşılaşılan analiz problemlerinin doğasına göre mühendisin FEA yazılımına doğrusal olmayan analiz özellikleri ekleyip eklememeye karar verilmelidir. Tasarım analizi problemleri büyük deformasyonlar, zar etkileri, doğrusal olmayan malzeme, temas gerilimleri, bükülme, doğrusal olmayan destekler veya başka doğrusal olmayan özellikler içeriyorsa tasarım mühendislerinin kullanımına yönelik şirket içi FEA yazılımlarına doğrusal olmayan analiz özellikleri eklenmelidir.

Son 10-20 yılda mühendisler, FEA'yı bir tasarım aracı olarak kullanmaya şartlanmışlardır. Artık FEA yazılımları, bilgisayar donanımları ve bulut bilişim, bu araç setlerine doğrusal olmayan analizi de kolayca ekleyebilecek şekilde gelişmiş durumdadır.

SOLIDWORKS'TEN SİMÜLASYON ÇÖZÜMLERİ

SOLIDWORKS artık en gelişmiş doğrusal olmayan olgular için tek kaynaklıdan çok kaynaklı doğrusal olmayan etkilere kadar eksiksiz bir yelpazede doğrusal olmayan analiz özellikleri ve ölçeklendirme imkanı sunmaktadır. SOLIDWORKS, SOLIDWORKS Simulation Premium ve bulut tabanlı SPE ile doğrusal olmayan analiz özellikleri sunmaktadır.

SOLIDWORKS Simulation Premium doğrusal olmayan ve dinamik yanıt, dinamik yükleme ve kompozit malzemeler için tasarımınızı verimli bir şekilde değerlendirmenizi sağlar ve iki gelişmiş doğrusal olmayan inceleme içerir: Doğrusal Olmayan Statik ve Doğrusal Olmayan Dinamik.

[SOLIDWORKS Simulation Paketi hakkında daha fazla bilgiyi buradan edinebilirsiniz.](#)

SIMULIA Structural Professional Engineer (SPE) SOLIDWORKS Simulation'ın özelliklerini genişleterek eş zamanlı olarak gerçekleşen birden fazla doğrusal olmayan etki ile analiz çözümlemesi ve çok adımlı sıralı yükleme sağlar. SPE, sağlam bir şekilde entegre edilmiş, bulut tabanlı bir çözümdür ve hem parça hem de montajlar üzerinde yapısal statik, frekans, bükülme, modal dinamik tepki ve yapısal termal analizlerin gerçekleştirilmesine olanak tanır. SIMULIA Abaqus desteğiyle kendini kanıtlamış dünya standartlarında Sonlu Eleman Analizi Çözümleyicisi SPE, yüksek karmaşıklık düzeyindeki yapısal problemleri güvenle ele almanıza olanak sağlar.

[SPE hakkında daha fazla bilgi edinin.](#)

3DEXPERIENCE® platformumuz marka uygulamalarımızı desteklemekte, 11 sektöre hizmet vermekte ve zengin bir endüstri çözümü deneyimleri portföyü sunmaktadır.

3DEXPERIENCE® Şirketi Dassault Systèmes, işletmelere ve kişilere sürdürülebilir yenilikler hayal etmeleri için sanal evrenler sunar. Şirketin dünya çapında lider çözümleri; ürünlerin tasarlanma, üretilme ve desteklenme biçimini değiştirmektedir. Dassault Systèmes'in işbirlikçi çözümleri, toplumsal yenilikçiliği teşvik ederek, gerçek dünyayı iyileştirmek için sanal dünyadaki imkanları genişletir. Grup, 140'tan fazla ülkede tüm sektörlerde her ölçekteki 250.000'den fazla müşteriye değer katar. Daha fazla bilgi için www.3ds.com/tr-tr adresini ziyaret edin.

