

# SONLU ELEMANLAR YÖNTEMLERİNİN TASARIM SÜREÇLERİNE YARARLI ETKİLERİ

Hakan Balaban<sup>1</sup>, Ufuk Penekli<sup>2</sup>

## 1. GİRİŞ

Sonlu elemanlar yöntemi endüstri standardı olarak hesaplamalı mekanik konularında sıklıkla kullanılan bir bilgisayar destekli mühendislik yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi günümüz bilgisayar teknolojilerinin de gelişmesi ile yapılan birçok hesaplamada endüstrinin önemli bir ihtiyacını karşılar hale gelmiştir. Sonlu elemanlar analizleri mevcut yazılımların veya belirli bir noktaya kadar kendimizin oluşturduğu kodların hesaplama yapmasını sağlayan matematiksel matris tabanlı bir hesap metodudur.

“Sonlu elemanlar analizleri geleceği tahmin etme sanattır” demiş Kalus-Jürgen Bathe; Sonlu Elemanlar Prosedürleri kitabının başında.[1]

<sup>1</sup> Mak. Yük. Müh., FE-TECH Ltd. Şti. - [hakan.balaban@fe-tech.com.tr](mailto:hakan.balaban@fe-tech.com.tr)

<sup>2</sup> Mak. Yük. Müh., FE-TECH Ltd. Şti. - [ufuk.penekli@fe-tech.com.tr](mailto:ufuk.penekli@fe-tech.com.tr)

Diğer bir özlü söz ise “Bütün modeller yanlıştır ama bazıları faydalıdır.” George E. P. Box tarafından söylenmiştir.[2]

Bütün modeller yanlıştır, ama yine de çok iyi fikir verdiği kesin gibi bir anlam taşımaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile birçok fenomen ve mühendislik yaklaşımı doğrulanmış ve ifade edilmiştir. Oldukça yakınsayan modellemelerin yanı sıra oldukça yanlış birçok sonuç da ortaya çıkmaktadır. Bu aşamada, analizi yapan kişilerin yetkinliği, fiziksel olayları algılamayabilme yeteneği ve temel fizik formülleri ile bile olsa modellediği problemi ifade edebilmesi önem kazanmaktadır.

Bu temel özelliklerin ardından ortaya mühendislik bakış açısı veya sağduyusu ortaya çıkmaktadır. Bu bakış açısı

nın gelişmesi yapılan analizlerin sonuçlarının değerlendirilmesi ve doğrulanması ile gelişmektedir. Bu gelişim doğrulama dediğimiz testlerle pekişmekte ve uzmanlaşma da sağlanmaktadır. Uzmanlıkları olan kişilerin en genel özelliği, bu ve benzeri çalışmaların yineleyerek hata korelasyon matrisinin istatistiksel oranlarına bağlı bir bakış açısıyla netleşmesi istedikleri hassasiyetlerdeki sonuçlara ulaşabilmektedir.

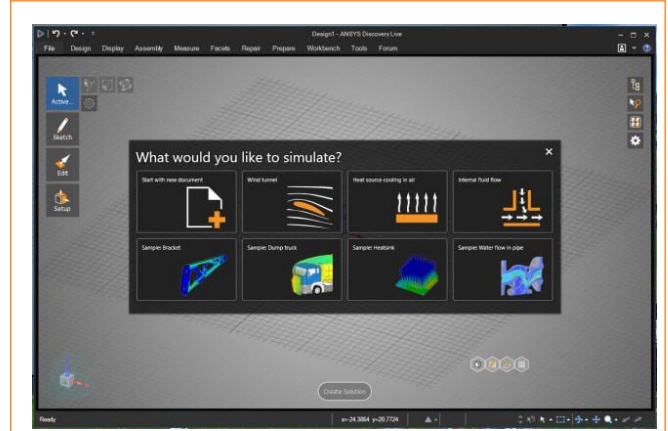
Sonlu elemanlar yöntemi ile tasarlanan parça, model ve sistemlerin zayıf noktalarının ifade edilmesi veya kuvvetli olduğu kısımların gösterilmesi renkli çıktılar veya oluşturulan videolar ile anlaşılır kılınmaktadır. Bu kısımda özellikle tasarımcıların belirli bir bilince ve tasarım alt yapısına sahip olduğu varsayıldığında, hesaplanan sonuç ve veriler eşliğinde tasarımlarını üst seviyeye çıkarması ve istenilen ölçütlere uygun hale getirmeleri sağlanmaktadır.

Sonlu elemanlar hesaplama yöntemi, karmaşık geometri ve parçaların eleman olarak adlandırılan sonlu sayıdaki hesaplama hücresine dönüştürülmesi ile bilgisayar işlemcisine aktarılan çözüm matrislerinin işlenmesi şeklinde olmaktadır.

Bu hesaplama noktalarının sıklığı çözümün doğruluğunu ve hassasiyetini etkilemektedir. Bu hassasiyetin çalışmalarda ortaya konması en az doğrulama kadar önemli bir işlemdir. Bu çalışmada genel mantık, farklı eleman büyüklüklerinin yakınsadığı değerlerin belirlenmesi, optimum eleman boyutu ile çalışmanın bu eleman boyutundan bağımsız bir halde değerlendirilmesine dayanmaktadır.

Sonlu elemanlar hesaplama yöntemi farklı eleman boyutu ve farklı senaryoların da incelenebilmesi gibi alt birçok analizi kendi içerisinde barındırdığı için, bu yöntemi kullanarak yapılan çalışma, aslında birçok alt çalışmayı da beraberinde getirmektedir. Bu işlemlerin tamamının sağlanması yüksek başarılı bilgisayarlar ile mümkün olabilmektedir. Bu bilgisayarlardaki yüksek işlemci sayısı ve hafıza kapasitesi (RAM), çok çeşitli analizlerin hızlı ve efektif bir biçimde yapılabilmesini sağlamaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminin en geniş uygulaması hazır yazılımlar vasıtası ile olmaktadır. Bu konuda birçok yazılım ve alt yazılım bu hesaplama yönteminde farklı konulara hizmet etmektedir. Bu yazılımlar lisanslama usulüne göre çalışmakta ve en az çözücü bilgisayarlar kadar yazılımların çözücülerinin verimliliği de bu konuda önem kazanmaktadır. Bu konu son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Çözücü olan yazılımlar kendi performans artı-



Şekil 1. Yazılım Ara Yüzlerinden Genel Bir Görünüm

rılarını geliştirmekte farklı hafıza kapasiteleri kullanarak daha büyük paketler halinde çözüm konusunda ilerlemeler kaydetmektedirler. Öte yandan GPU denilen grafik kartlarının işlemcilerinin de dâhil olduğu farklı çözümler, günümüz sonlu elemanlar dünyasına hız kazandıran etmenlerden olmaktadır.

Sonlu elemanlar ile yapılan analizlerde çözücü, elemanlar ve eleman boyutları gibi ifadeleri takiben basitleştirme ve elemanların oluşturulduğu "pre-processing" yani ön işleme adımı gelmektedir. Bu kısımda da çözücülerin sunulduğu yazılımların haricinde farklı yaklaşımlar ve ağ yani "mesh" oluşturma yazılımları mevcuttur. Bu kısımda geometride istenilen basitleştirmelerin yapılması, her türlü detayı barındıramaması gibi konular mevcuttur. Farklı bir anlamda bu kısım bir modelleme biçimi olarak da ortaya çıkmıştır. "Solid" yani katı modelleme, "Shell" yani kabuk modelleme ve "Beam" yani kolon veya kiriş modelleme olarak da adlandırılmaktadır. Ağ oluşturma yani "mehleme" işleminden sonra parçalar arası birleşimlerin ifade edilmesi yani kontaklar, malzeme atanması ve sınır şartlarının tanımlanması adımı gelmektedir.

Ön işleme adımının ardından, çözücüde matematiksel modelin çözdürülmesi ve sonrasında sonuçların incelenmesi adımı gelmektedir. Bu işlem "post-processing" yani ardıl işlem olarak adlandırılır. Renkli çıktılar ve simülasyonların animasyon videoları ile rapor veya sunumların içerikleri bu aşamada oluşturulur.

## 2. ANALİZ TİPLERİ VE FARKLI FİZİK DALLARINDA HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

Genel olarak analiz tiplerine bakıldığında statik analizler, dinamik analizler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ana-

lizleri, termal analizler, elektro-manyetik analizler, akustik analizler, elektro-mekanik analizler, çoklu cisim dinamiği analizleri, titreşim analizleri, yorulma analizleri, tasarım optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu analizleridir. [3]

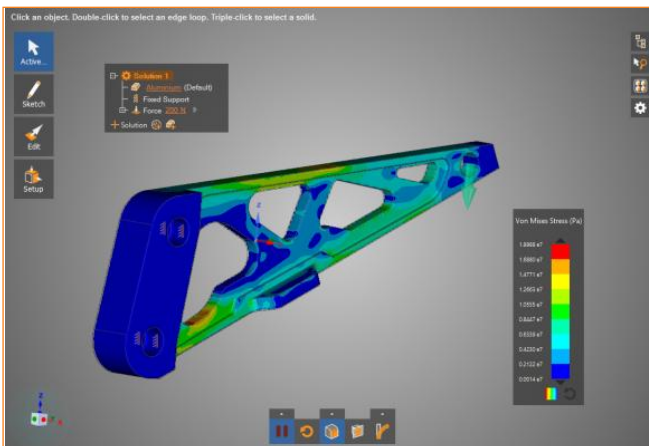
## 2.1 Statik Analizler

Statik analizler, yapısal analiz olarak da adlandırılabilir gibi, sabitlenmiş bir sistemin elastik bölgede kuvvet limitlerinin incelenmesi ve malzemesine karar verilmesi amaçlı yapılan analizlerdir. Bu analizlerde girdi olarak kuvvet, moment, deplasman ve sıcaklık gibi temel veriler kullanılmaktadır. Çıktıları ise, sehim, gerilme ("strain"), gerilme ("stress") gibi sonuçlardır. Statik analizler, lineer ve çok hızlı çözüm veren bir analiz yöntemidir. Bu lineerleştirme, neredeyse yapılan analizlerin %90'ını kapsamaktadır.

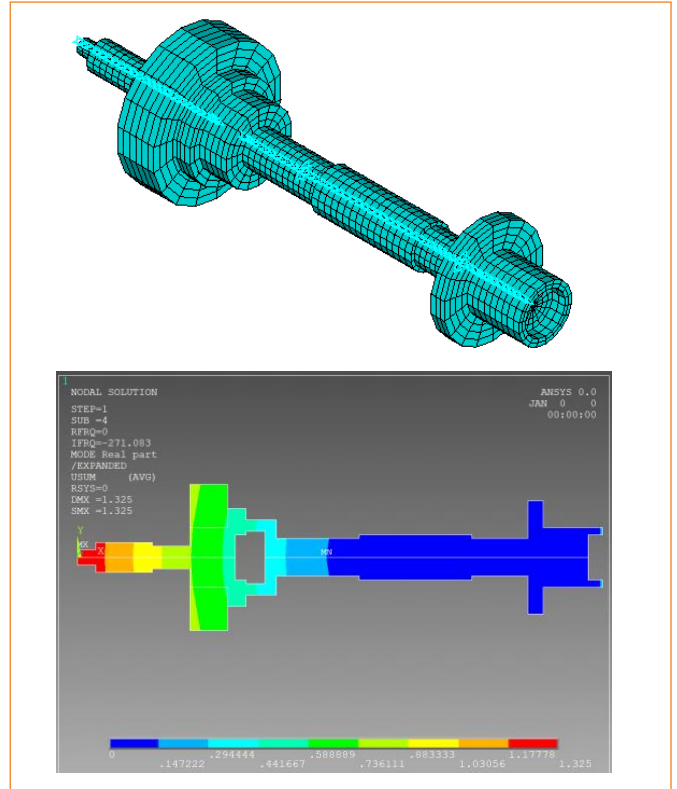
## 2.2 Dinamik Analizler

Dinamik analizler, daha gerçeğe yakın zamana bağlı ve atalet etkisinin de dikkate alındığı analizlerdir. Dinamik analizler için farklı çözüm yöntemleri de geliştirilmiştir. İmpilisit ve ekspilisit olmak üzere iki ana başlığa ayrılabilen lineer olmayan ("non-linear") analizlerdir. Bu işlem sırasında, çözücülerin her bir zaman veya çözüm adımında tekrar tekrar çözüm almaları, bir önceki çözüm adımındaki etkileri bir sonraki çözüm adımına aktarmaları gerekmektedir. İmpilisit analizlerde daha büyük zaman adımı ile bir önceki zaman adımına göre reaksiyon kuvvetlerinin oranına bakıp bir yakınsama hesabı yapılırken, ekspilisit analizlerde oldukça düşük bir zaman adımı ile her bir çözüm bir sonrakine göre türev alınarak yapılmaktadır.

Bu bağlamda, yarı statik veya sanki statik gibi olan zamana bağlı atletlerin çok büyük oranda devrede olma-



Şekil 2. Statik Analiz

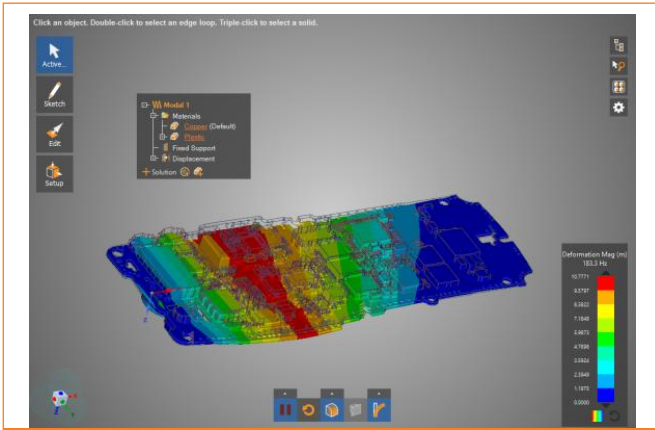


Şekil 3. Dinamik Analiz

dığı durumlarda, örneğin plastik bir kapağın oturtulması gibi, impilisit olarak lineer olmayan yöntem kullanılırken, araba çarpışması, şok veya mayın patlaması gibi yüksek gerilim hızlarına sahip ve atletlerin oldukça etkin olduğu çalışmalarda ekspilisit analiz tipi kullanılmaktadır.

## 2.3 Titreşim Analizleri

Titreşim analizleri, yapıların doğal frekanslarının yani modlarının elde edilmesinden başlayarak harmonik ve spektral analizler olarak ifade edilir. Doğal frekanslarını bilmek yapının katılığı hakkında önemli bir bilgi sağlamaktadır. Yapıya, harmonik analizlerde belirli bir frekansa gelen bir kuvvet söz konusudur. Öte yandan spektral analizlerde frekans bandında ivme, hız veya deplasman girdisi ile sistem zorlanmaktadır. Bu tip analizlere örnek olarak bir aracın yol boyunca maruz kaldığı irili, ufaklı çukur ve tümseklerden geçerken üzerine gelen titreşimleri benzetebiliriz. Bu örnek için titreşim analizi, kabaca aracın hangi frekanslarda küçük ve büyük çukurlara girdiğine göre bir ölçüm yapıp bunun yapıya bir yükleme biçimi olarak uygulanması ve istatistiksel olarak oluşan gerilmelerin incelenmesi olarak tanımlanabilir.

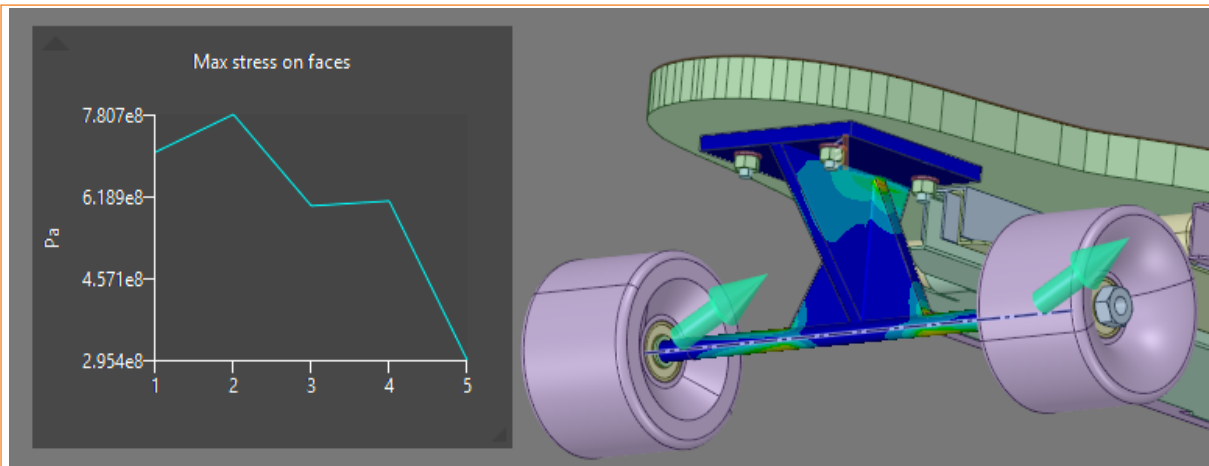


Şekil 4. Doğal Frekans/Modal Analiz

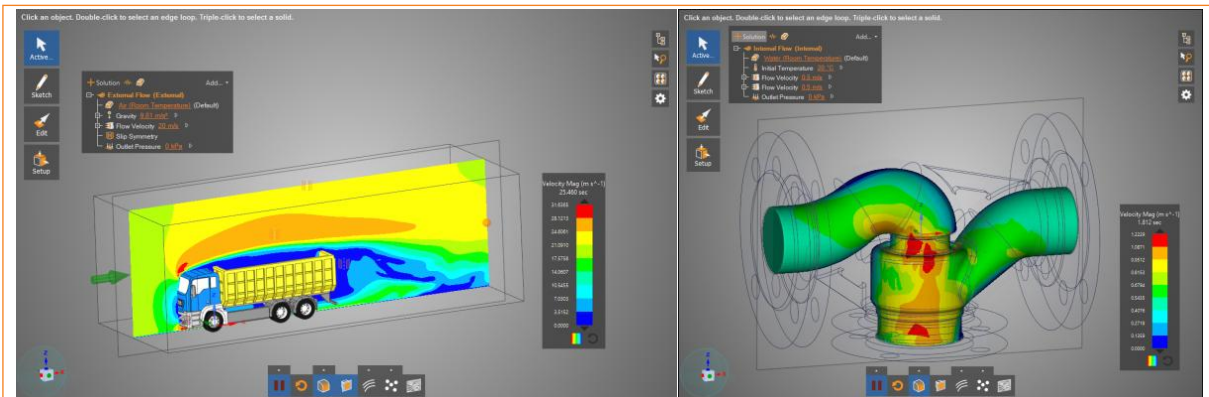
ında yorulma kaynaklı hasar görmelerinin incelendiği bir analiz biçimidir. Bu analiz türünde, malzemelerin yorulma grafiği dediğimiz gerilme-çevrim veya gerinme-çevrim grafikleri kullanılır. Bu amaç için çalışan farklı yazılımlar, bir çok farklı kombinasyon ve malzeme kütüphaneleri sunmaktadırlar.

## 2.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizleri

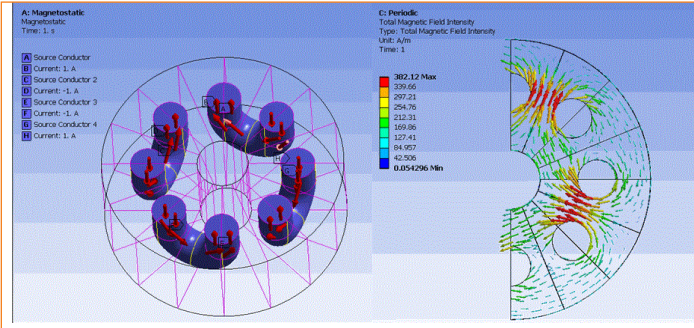
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri, sıvıların ve gazların davranışlarının incelendiği bir analiz şeklidir. Bu analiz türü ile sıkıştırılabilir olarak tanımlanan gaz ve sıvıların belirli bir hacimde iç ve dış akış, türbülanslı ve laminar olduğu durumların farklı algoritmalarla incelemesi yapılmaktadır. Bu analiz türünde, sonlu farklar veya sonlu hacimler gibi sonlu elemanlar yönteminden farklı yöntemler de devreye girmektedir. Bu yapılan çalışmaların hemen hepsinde, sistemi çözdürülebilir belirli boyuttaki yapılara bölmek ve hesaplama yapmak amaçlanmaktadır. Bu analiz türünde kullanıcı tarafından bilinmesi gereken diğer bir konu da akış akışın yoğun olduğu bölgelerin daha sık bir eleman yoğunluğunun sağlanması veya Reynolds sayısının değerine bağlı olarak doğru bir türbülans algoritması seçilmesi gerekliliğidir. Dış akışa örnek olarak rüzgâr tünelineki bir araç düşünülebilirken, iç akış için bir vana içerisinde geçen su örneği düşünülebilir.



Şekil 5. Yorulma Analizleri



Şekil 6. Dış ve İç Akış Analizleri



Şekil 7. Elektro Manyetik Analizler

## 2.6 Elektromanyetik Analizler

Elektromanyetik analizler, elektrik akımı ile malzemede oluşan manyetik indüklenmenin simülasyonudur. Bu analiz türünde, özellikle son dönemde elektrikli araç ve motor teknolojisindeki gelişmeler ile, manyetik alanın yönlendirilmesi, farklı dizilim sonuçlarının kıyaslanması ve değerlendirilmesi amaçlı analizler yapılmaktadır.

## 2.7 Elektromekanik Analizler

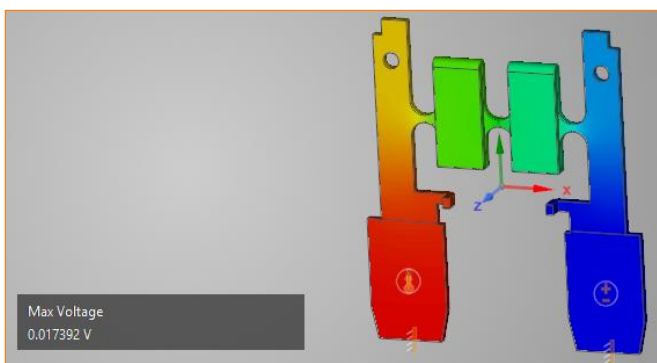
Elektromekanik analizler, malzemelerin elektrik geçirgenliği de dikkate alınarak elektrik akışının hesap edildiği ve kontaklı sistemlerin birbirleri ile nasıl etkileşimde olduğunun incelendiği bir analiz biçimidir. Bu analiz türü için araba anahtarının kontağı örnek olarak verilebilir.

## 2.8 Termal Analizler

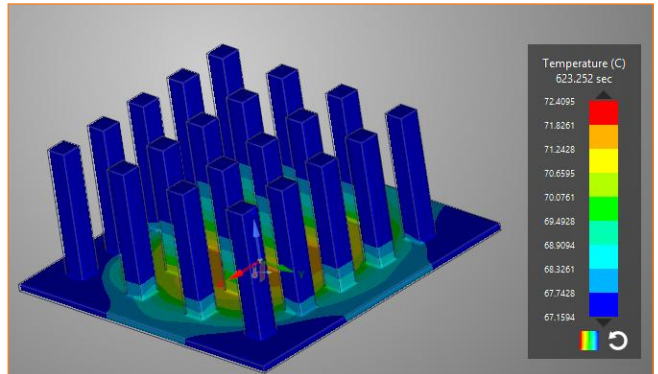
Termal analizler, yapıların hem ısı transferi yönünden, hem de ısı akış ile değişiminin, iletim, taşınım ve genleşme nedenleri ile gerçekleşen etkilerinin incelendiği bir analiz şeklidir. Bu analiz türü için, bir ısı kaynağının soğutulması için ısıyı yayan bir alüminyum parça örnek gösterilebilir.

## 2.9 Çoklu Cisim Dinamiği

Çoklu cisim dinamiği, katı olarak kabul edilen parçaların



Şekil 8. Elektro Mekanik Analizler



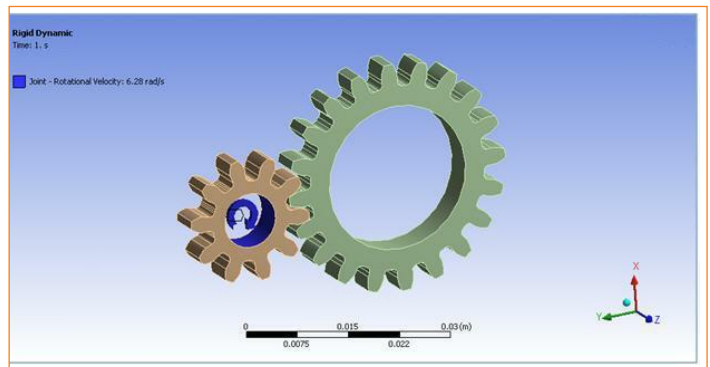
Şekil 9. Termal Analizler

birbirleri ile ilişkilerinin ifade edildiği ve zamana bağlı yani dinamik bir biçimde çalışmalarının etkilerinin incelendiği bir analiz şeklidir. Çoklu cisim dinamiğinin en büyük özelliği, karmaşık çalışma yapısına sahip parçaların, sistemlerin, makine ve araçların çalışmasının modellenmesini ve süspansiyon, yay, ön gerilmeler gibi analizi yapılan elemanların birbirlerine aktardığı değerlerin doğru bir biçimde ifade edilmesini sağlamasıdır. Bu analiz türü ile, bir parça üzerine gelen yükler net bir şekilde ortaya koyulabilmekte ve yapısal analizler daha doğru sınır şartları ile yapılabilmektedir.

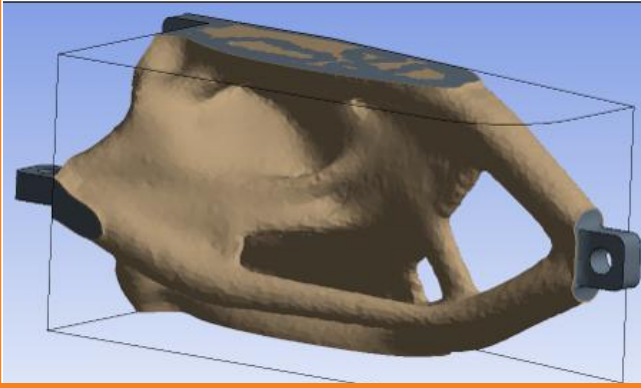
## 2.10 Optimizasyon Analizleri

Optimizasyon analizleri, temelde iki farklı analiz şekli olarak ifade edilmektedir. Birincisi, tasarım optimizasyonu, ikincisi ise topoloji optimizasyonudur.

Tasarım optimizasyonu, birden çok parametrenin akıllı bir algoritma veya Deney Tasarımı ("Design of Experiment – DOE") yöntemi ile sonuçlarının ortaya konulması ve istatistik olarak bunların yorumlanmasıdır. Bu analiz şekli, bir testin sonucunun doğrulamasında farklı parametrelerin değerlendirilmesi olarak tanımlanabilir.



Şekil 10. Çoklu Cisim Dinamiği Analizleri



Şekil 11. Topoloji Optimizasyonu Analizi

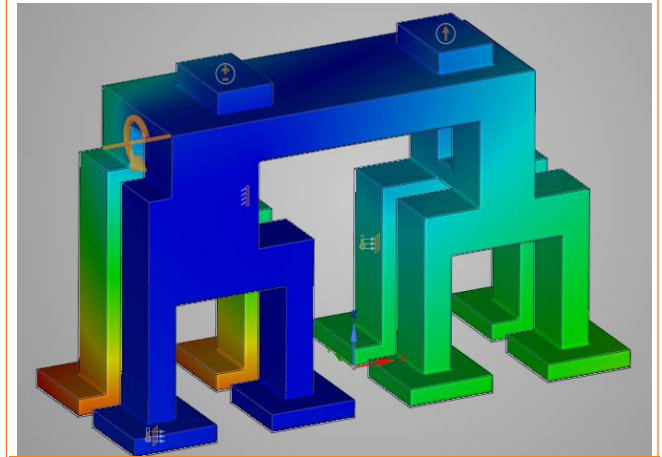
Topoloji optimizasyonu, sınırları belirlenmiş bir geometrinin yükler altında istenilen ölçütler, minimum veya belirlenen ağırlık ile maksimum katılık hedefini temel alarak en iyi geometrinin elde edilme işlemidir. Bu analiz türünde, yazılımlar birden fazla çözüm yaparak bu geometride gerilmelerin az geldiği bölgeleri her seferinde sistemden çıkartarak bir yaklaşım yapar. İmalata uygun bir biçimde geliştirilen sınır şartları ile ve bu yöntem kullanılarak belirtilen koşullarda ve en az malzeme ile imal edilebilir yapıların tasarlanma becerisi kullanıcılara sunulmuştur.

### 2.11 Çoklu Fizik Analizleri

Çoklu fizik analizleri, yukarıda belirtilmiş olan analiz türlerinin türlerinin birlikte uygulanmasıdır. Bu analiz türü için hem termal etkilerin olduğu hem de mekanik yüklerin uygulandığı Şekil 12'deki yapı örnek gösterilebilir.

## 3. MODELLEME YÖNTEMLERİ VE DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN KONULAR

Sonlu elemanlar ağ modelinin nasıl oluşturulduğu ve ağ model yaklaşımının kalitesi, sonuçların doğruluğunu doğrudan etkileyen önemli bir diğer etkidir. Öncelikle yapıların ve yapılacak işin fiziğine uygun modelleme şeklinin belirlenmesi gerekmektedir. Örneğin sac metal parçalar için kabuk modelleme tekniği en hızlı ve en doğru sonuçları verirken, döküm parçalar için katı ("solid") modelleme tekniği kaçınılmazdır. Fakat örneğin eğme testi yapılacak bir profile gelişi güzel bir katı ağ ("solid mesh") ve yanlış bir boyutlandırma bilgisi girilirse, test ile sonuçları yakınsatmakta oldukça sorun yaşanacağı öngörülebilmektedir. Öte yandan sınır şartlarının doğru tanımlanması, kontak dediğimiz temas ifadelerinin doğru tanımlanması ve yapılacak analiz türüne göre doğru bir malzeme modeli



Şekil 12. Çoklu Fizik Analizleri

ve malzeme parametrelerinin seçilmesi önemlidir. Firmaların modelleme becerisinden sonra analiz becerilerini de kazanmaları, ürettikleri ürünlerin daha az sayıda prototip gerektirecek ve daha akıllıca tasarımlarına olanak sağlayacağı aşikardır.

## 4. SONUÇ

Sonlu elemanlar yöntemi ile birçok farklı hesaplamayı yapmak ve sanal olarak testlerini yapmak, ürünleri, henüz imalat yapmadan sonuçlarını görmek ve dolayısıyla tüm değişik fikirleri bu şekilde değerlendirmek mümkündür. Bu seviyeye ulaşmak için belirli bir alt yapı ve birikimin getirdiği de açıktır.

Bu birikimin oluşması zaman alan bir süreçtir. Firmaların bu zamanı bir şekilde yaşamaları gerekmektedir. Bu süreçte hatalar da yapılacaktır. Bir araba çarpışma simülasyonu veya denizin içinde patlayan bir mayının gemiye etkileri gibi en karmaşık sistemlerin analizlerine dahi, en basit örnekten ve doğrulana bilir numunelerden başlamak yavaş bir yöntem gibi gözükse de en doğru ve kararlı bir yaklaşım şekli olacaktır. Son testin veya parçanın sonucunun doğru bir şekilde hesaplanması en üst nokta olarak tanımlanırsa, bu noktanın altında bir piramit yapı inşa edilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

## KAYNAKÇA

1. BATHE, K.J. ,2014, Finite Element Procedures, ISBN 978-0-9790049-5-7, United States.
2. Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/George\_E.\_P.\_Box, 01/01/2021
3. ANSYS Release 2021 R1 User's Guide @ ANSYS, Inc.