

Ayda bir yayımlanır

mühendis makina ve ünce

www.mmo.org.tr/muhendismakinaguncel

ISSN: 2564-7296
E-ISSN: 2667-7547



tmmob
makina
mühendisleri
odası

HAZİRAN
2025-6

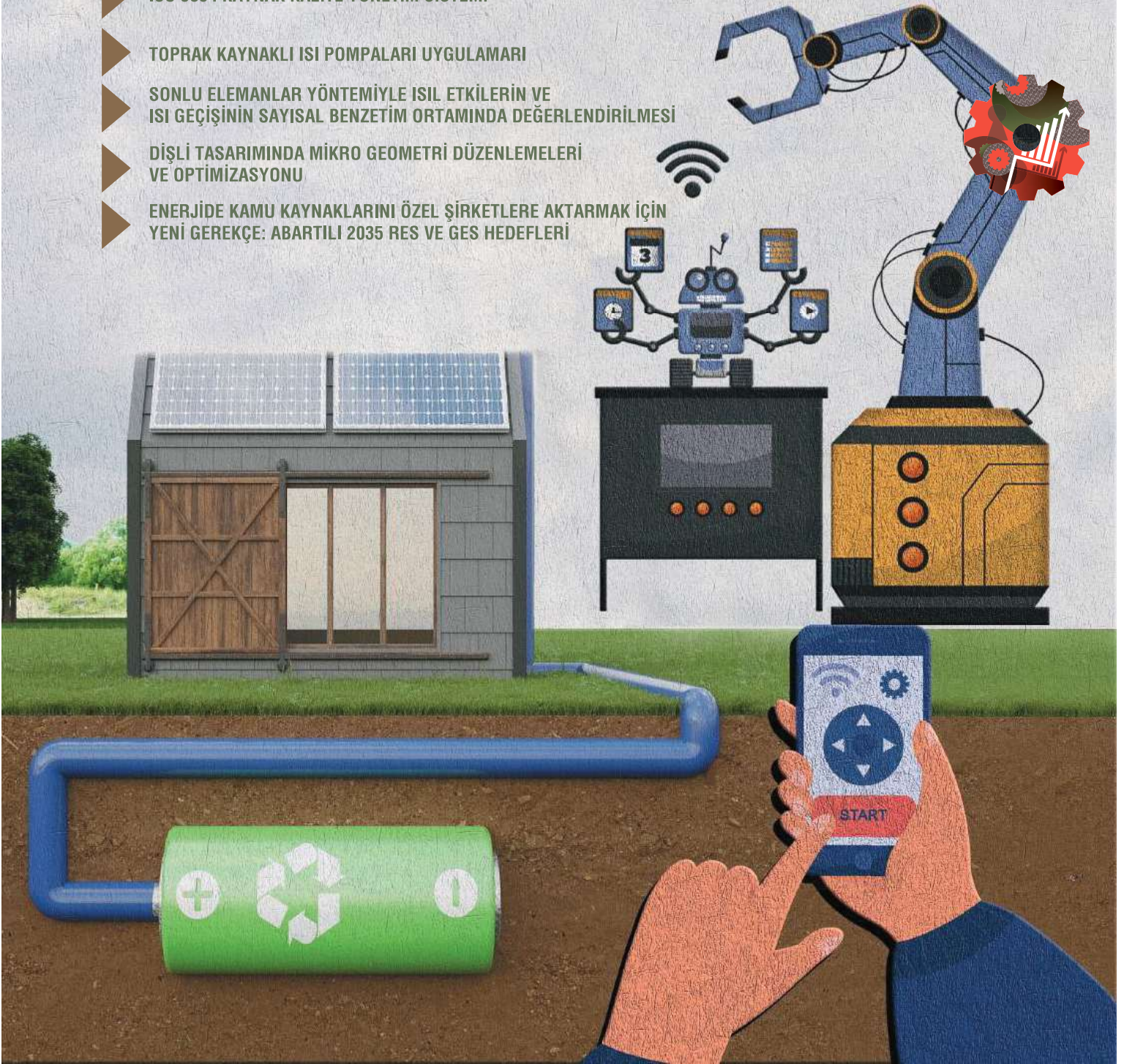
ISO 3834 KAYNAK KALİTE YÖNETİM SİSTEMİ

TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPALARI UYGULAMARI

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ISIL ETKİLERİN VE
ISI GEÇİŞİNİN SAYISAL BENZETİM ORTAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

DİŞLİ TASARIMINDA MİKRO GEOMETRİ DÜZENLEMELERİ
VE OPTİMİZASYONU

ENERJİDE KAMU KAYNAKLARINI ÖZEL ŞİRKETLERE AKTARMAK İÇİN
YENİ GEREKÇE: ABARTILI 2035 RES VE GES HEDEFLERİ



mühendis ve makina  ncel

HAZİRAN 2025

Cilt: 66 Sayı: 785

Yerel Süreli Yayın

MMO Adına Sahibi

Publisher

Yunus YENER

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Executive Editor

Yunus YENER

Yayın Sekreteri

Editorial Secretary

Ceren YILMAZ ARAS

Yayın Kurulu

Editorial Board

Fuat T N Ş

S. Melih ŐAH N

Deniz Alp YILMAZ

Levent  ORBACIO LU

C. Serdar SÖNMEZ

Bar   Oğuz GÜRSES

Serdar UZGUR

Aytekin ÇAKIR

Dursun    EK

Hasan KOBAK I

Do ukan KARACA

İlan Adres

Advertising Representatives

yayin@mmo.org.tr

Kapak ve Sayfa Tasarımı

Cover and Page Design

Gözde AKMAN

Teknik Sorumlu

Technical Manager

Mehmet AYDIN

Yönetim Yeri

Head Office

Meşrutiyet Cad. No: 19/6

Kızılay - ANKARA

Tel: +90 312 425 21 41

Fax: +90 312 417 86 21

E-posta: yayin@mmo.org.tr

A : www.mmo.org.tr

Baskı Yeri

Printed by

Cem Web Ofset A. .

Alinteri Bulvarı No: 29 Ostim - Ankara

Tel: +90 312 385 37 27

Basım Tarihi: 28 Nisan 2025

Baskı Sayısı: 15.000

TMMOB Makina Mühendisleri Odası yayın organı olan ve 1957 yılından itibaren yayımlanan (iki farklı isimle yayımlanmıştır.) Mühendis ve Makina dergisi, 2017 yılından itibaren Mühendis ve Makina Güncel ismiyle Makina Mühendisleri Odası  yelerine gönderilmektedir. Dergimizle ilgili detaylı bilgi almak için www.mmo.org.tr genel a  adresinden yararlanabilirsiniz. Ayrıca telefon, faks veya e-posta yoluyla da bize ulaşabilirsiniz.

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ISIL ETKİLERİN VE ISI GEÇİŞİNİN SAYISAL BENZETİM ORTAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Doğukan ALKAN¹

1. GİRİŞ

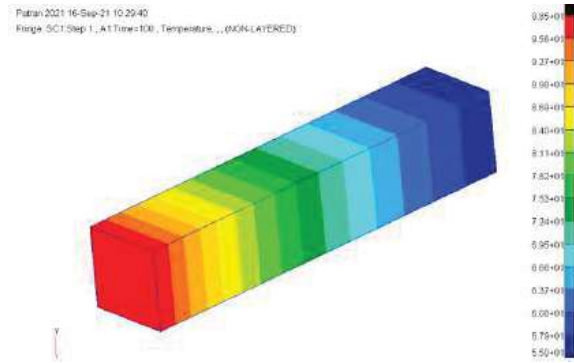
Mühendislik uygulamalarında, özellikle ısı yükler altındaki yapıların davranışını doğru bir şekilde öngörmek, tasarımın güvenilirliği açısından büyük bir önem taşır. Isı geçişi (transferi) analizleri, mühendislik sistemlerinin ısı etkilerini değerlendirmede önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu analizler, sıcaklık değişimlerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini anlamaya, sistemlerin soğutma ve ısıtma süreçlerini iyileştirmeye olanak tanımaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM – Finite Element Method), mühendislikte bu tür karmaşık çalışmaları gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılan güçlü bir sayısal analiz yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi, yapısal ve ısı analiz çalışmalarında, çok yönlü bir çözüm yeteneği sunarak, ısı iletiminden (kondüksiyondan) taşınımına (konveksiyona) kadar çeşitli ısı geçişi biçimlerinin modellenmesine olanak tanımaktadır. FEM yöntemiyle, sistemlerin zaman içindeki ısı tepkileri incelenebilir ve sıcaklık dağılımları ile ilgili hassas sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bu yazıda, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen ısı analizlerin temel ilkeleri ile bu analizlerin mühendislik uygulamalarındaki sonuçları ele alınacaktır. Isı geçişine bağlı olarak, yapıların yükler altındaki dayanıklılığının nasıl etkilendiği analizlerin sonuçları üzerine tartışılacaktır.

Ayrıca, farklı ısı geçiş biçimlerinin nasıl modellenebileceği ve bu modellerin sonuçlarının gerçek dünyadaki mühendislik sorunlarına nasıl uygulanabileceğide örneklerle açıklanmıştır.

Yürütülen çalışma sonucunda, farklı ısı geçiş biçimlerinin mühendislik yapıları üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak gözlemlenmiş, özellikle radyasyon sınır koşullarında yüzey emisyon katsayısının sıcaklık dağılımına olan duyarlılığı ortaya konulmuştur. Ayrıca, ısı yüklerin doğru biçimde modellenmesinin, yapının ısı genleşme ve sıcaklık kaynaklı gerilme dağılımını doğrudan etkilediği belirlenmiştir.

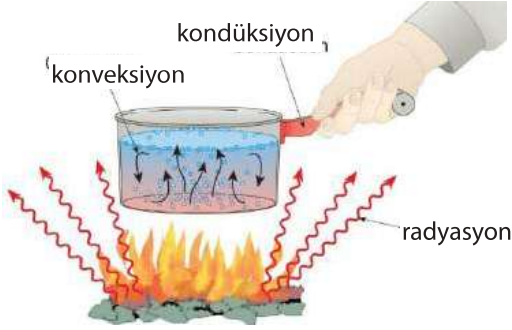


Şekil 1. Analiz Ortamında Sıcaklık Dağılımının Görselleştirilmesi

¹ Kıdemli Yapısal Analiz Mühendisi, Bias Mühendislik dalkan@bias.com

2. ISI GEÇİŞ BİÇİMLERİ

Isı geçişi, mühendislik uygulamalarında sistemlerin ısı davranışını anlamak için önemli bir etkidir. Bu çalışmada ele alınacak üç temel ısı geçiş biçimi bulunmaktadır; iletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışıınım (radyasyon). Bu biçimlerin her biri, farklı fiziksel süreçleri temsil ettiğinden ısı davranışlarının analiz edilmesinde farklı çözüm yaklaşımları gerektirmektedir.



Şekil 2. Isı Geçiş Biçimlerinin Gösterimi

2.1 İletim (Kondüksiyon)

İletim, sıcaklık farkının olduğu katı veya sıvı bir ortamda, moleküllerin enerjilerini birbirine aktararak ısıyı iletmesidir. Kondüksiyon, özellikle metal gibi yüksek ısı iletkenliği olan malzemelerde etkili olup, genellikle mühendislik uygulamalarında malzemelerin içindeki sıcaklık dağılımlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde, iletim analizi yapılırken, Fourier'ın ısı iletim eşitliği kullanılır [3]. Bu eşitlik, sistemdeki sıcaklık gradyanlarına dayalı olarak, enerji akışını hesaplar:

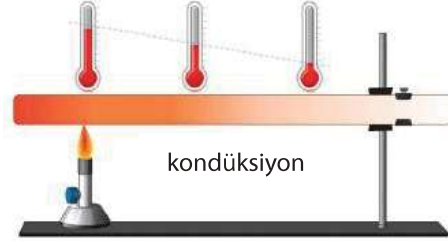
$$q = -k * A * \frac{\Delta T}{L} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

Burada:

- q: Isı akısı yoğunluğu (W/m²)
- k: Malzemenin ısı iletkenliği (W/m·K)
- A: Isı transfer alanı (m²)
- ΔT: Sıcaklık farkı (Kelvin)
- L: Isı iletim uzaklığı (m)

Bu eşitlikte, ısı akışının büyüklüğü malzemenin ısı iletkenliği, transfer edilen ısı miktarı ve ısı geçişine katılan alan ile

doğrudan ilişkilidir. İletim, genellikle mühendislik malzemeleri seçiminde önemli bir etkidir. Çünkü bu süreç, yapısal parçaların soğutma veya ısınma davranışını etkilemektedir.



Şekil 3. İletim Biçimini Gösteren Bir Örnek

2.2 Taşınım (Konveksiyon)

Taşınım, akışkanlar aracılığıyla gerçekleşen ısı geçiş biçimidir ve ikiye ayrılır; doğal (serbest) taşınım ve zorlanmış taşınım.

Doğal taşınım, ısı farkları nedeniyle oluşan akışkan hareketlerinden kaynaklanmaktadır.

Zorlanmış taşınım ise, örneğin bir fanın sıcak havayı bir ortamdan çekmesi gibi, dış bir güç tarafından oluşturulan akış ile gerçekleşir.

Taşınım, özellikle elektronik soğutmada, iklimlendirme (HVAC) sistemleri ve enerji santrallerinde kullanılan önemli bir ısı geçiş biçimidir.

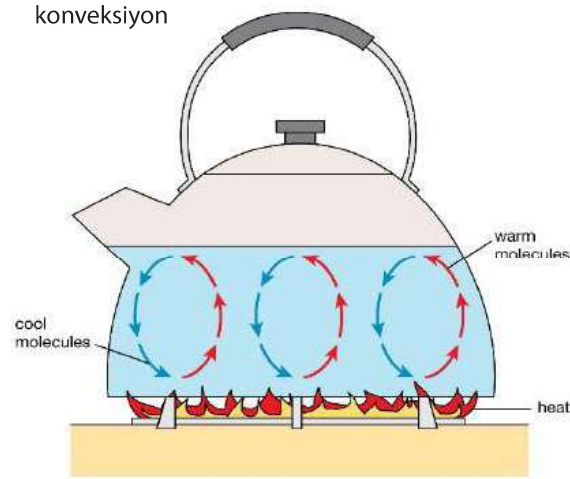
Taşınım yoluyla ısı geçişi, Newton'un soğuma yasasına göre modellenir [4].

$$q = h * A * (T_s - T_\infty) \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Burada:

- q: Isı akısı yoğunluğu (W/m²)
- h: Taşınım katsayısı (W/m²·K)
- A: Isı transfer alanı (m²)
- T_s: Yüzey sıcaklığı (K)
- T_∞: Akışkanın ortam sıcaklığı (K)

Bu eşitlik, yüzey ile akışkan arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak gerçekleşen taşınım ısı geçişini tanımlamaktadır. Doğru taşınım katsayılarını hesaplamak, ısıyı etkin bir şekilde yönetmek için büyük önem taşır.



© Encyclopædia Britannica, Inc.

Şekil 4. Taşınım Biçimini Gösteren Bir Örnek

2.3 Işınım (Radyasyon)

Işınım, ısı enerjisinin bir yüzeyden diğerine elektromanyetik dalgalar aracılığıyla aktarılması sürecidir. Bu ısı geçiş biçimi, herhangi bir ortam gerektirmez ve genellikle vakumda veya büyük sıcaklık farkları olduğunda etkili olmaktadır. Işınım yoluyla ısı geçişi, özellikle güneş enerjisi sistemleri ve yüksek sıcaklıktaki fırınlarda önemli bir ısı geçiş biçimidir.

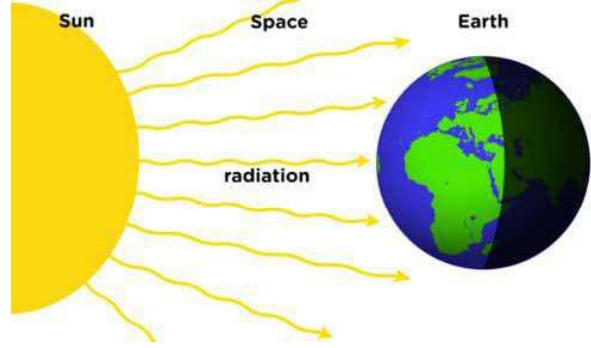
Işınım ile ısı geçişi, Stefan-Boltzmann yasası ile tanımlanır [5].

$$q = \sigma * \epsilon * A * (T_s^4 - T_c^4) \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Burada :

- q: Işınım yoluyla yayılan ısı (W)
- σ : Stefan-Boltzmann sabiti ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
- ϵ : Yüzeyin emisyon katsayısı (0 ile 1 arasında)
- A: Isı transfer alanı (m^2)
- T_s : Yüzey ve çevre sıcaklıkları (K)

Işınım, yüzeyin salım (emisyon) katsayısı ile doğrudan ilişkilidir ve bu katsayı, malzemenin yüzey özelliğine bağlıdır. Malzemelerin yüzey özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanması, ısıtım yoluyla ısı kayıplarını veya kazanımlarını modellemek açısından önemli olmaktadır.



Şekil 5. Işınım İle Isı Geçişini Gösteren Bir Örnek

3. MSC Nastran'DA ISI GEÇİŞİ MODELLEME ELEMANLARI

MSC Nastran; MSC Software (MacNeal-Schwendler Corporation) tarafından NASA için hazırlanmış NASA Structural Analysis yapısal analiz yazılımı olup, ısı incelemelerin gerçekleştirilmesi için çeşitli eleman türleri ve malzeme modelleri sunmaktadır. Bu elemanlar ve modeller, farklı analiz türlerine göre seçilebilir ve kullanıcılara geniş bir esneklik sağlamaktadır.

Isıl modelleme, doğru eleman tiplerinin ve malzeme özelliklerinin seçilmesi ile başlamaktadır.

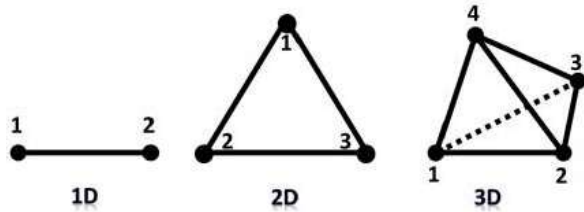
3.1 Isı Geçiş İçin Kullanılan Eleman Türleri

MSC Nastran'da ısı analizler için kullanılabilecek elemanlar; 1D, 2D ve 3D olarak üç ana sınıfa ayrılır. Bu elemanlar, modellemede kullanılan geometriye ve analiz edilecek ısı geçişi türüne bağlı olarak seçilmektedir.

• **1D Elemanlar:** Boru (Bar) ve Kiriş (Beam) Elemanları. Bu elemanlar, uzun ve ince yapılar boyunca ısı geçişini simüle etmek için kullanılır. Özellikle borular, kablolar veya dar kanallar gibi yapıların analiz edilmesinde kullanışlıdır [6].

• **2D Elemanlar:** Kabuk (Shell) Elemanlar. 2D elemanlar, ince yüzeyler üzerindeki ısı geçişini modellemek için kullanılır. Levhalar, yüzeyler ve duvarlar gibi ince yapıların yüzey sıcaklık dağılımlarını anlamak için uygun olmaktadır [6].

• **3D Elemanlar Katı (Solid) Elemanlar.** 3D elemanlar, hacim boyunca ısı geçişini gerçekleştiren yapılarda kullanılır. Daha karmaşık geometriler ve homojen olmayan sıcaklık dağılımlarında 3D elemanlar daha doğru sonuçlar vermektedir [6].



Şekil 6. Isı Geçiş İncelemelerinde Kullanılan Elemanların Gösterimi

Bu elemanların doğru seçimi, analiz sonuçlarının doğruluğunu etkileyen önemli bir etkidir. Her eleman türü, belirli bir inceleme tipine uygun olduğundan, modelleme sırasında dikkatli bir şekilde seçilmelidir [7].

3.2 Malzeme Özellikleri

Isı iletimi analizlerinde, malzemelerin ısı özellikleri doğru bir şekilde tanımlanmalıdır. MSC Nastran'da, malzemelerin ısı iletkenliği, ısı kapasitesi ve yoğunluğu gibi özellikler tanımlanmalıdır. Bu özellikler, iletim, taşınım ve ışıınım gibi farklı ısı geçiş türlerine göre değişiklik göstermektedir [8].

- **İzotropik Malzemeler:** Isı iletkenliği her yönde aynıdır. Bu tür malzemeler genellikle homojen yapıya sahiptir.
- **Anizotropik Malzemeler:** Isı iletkenliği, farklı yönlerde değişiklik gösterir. Bu tür malzemeler, genellikle karma malzemeli (kompozit) yapıların incelenmesinde kullanılır.

4. ISIL ANALİZ TÜRLERİ

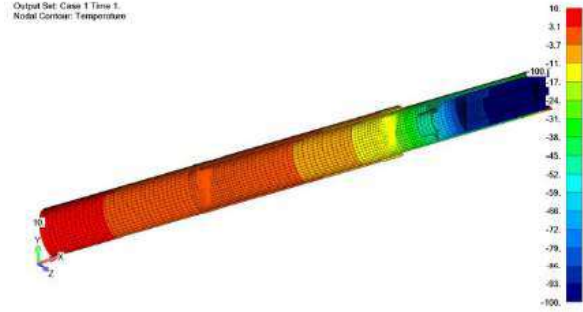
MSC Nastran, çeşitli ısı analiz türlerini desteklemektedir. Bu analizler, mühendislik sistemlerinde ısı geçişini ve sıcaklık değişimlerini modellemek için kullanılmaktadır.

Genel olarak, ısı analizler, durağan (steady-state) ve zamana bağlı (transient) analizler olarak iki ana sınıfa ayrılır. Ayrıca, bu analizler doğrusal ya da doğrusal olmayan şeklindedir. Bu durum da analiz sonuçlarının doğruluğu ve modelin gerçek hayattaki davranışlarını yansıtmaya açısından önem taşımaktadır.

4.1 Durağan Isı Analiz

Durağan ısı analizde, sistemin sıcaklık dağılımı, zaman içinde sabit kalmaktadır. Başka bir deyişle, bir süre sonra sistem, ısı dengeye ulaşır ve ısı girişi ve çıkışları sabit bir düzeyde kalır. Durağan ısı analiz, sürekli çalışan makineler, elektronik bileşenler ve enerji santralleri gibi sistemlerde kullanılır. Bu analiz türü, sistemin uzun dönemde nasıl tepki verdiğini anlamak için önemli bir araç olmaktadır.

- **Özellikler:** Zaman değişkeni içermez, sistem ısı dengeye ulaşır.
- **Kullanım Alanları:** Elektronik soğutma, enerji üretimi, iklimlendirme (HVAC) sistemleri



Şekil 7. Durağan Isı Analiz Örneği

4.2 Zamana Bağlı Isı Analiz

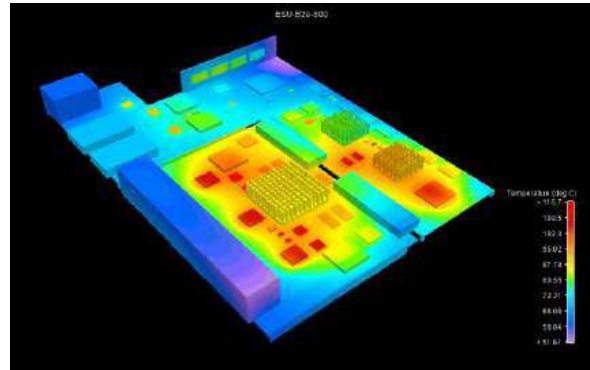
Zamana bağlı ısı analizde, sistemdeki sıcaklık dağılımı zamanla değişmektedir. Bu analiz türü, sıcaklık değişimlerinin zaman içindeki dinamik davranışını incelemek için kullanılmaktadır.

Özellikle hızlı sıcaklık değişimlerinin olduğu sistemlerde, zamana bağlı ısı analiz sonuçları, sistemin nasıl tepki vereceğini öngörmek için önemli olmaktadır. Bu analiz türü, ısı şoklar, hızlı ısınma veya soğutma gibi süreçleri simüle etmek için kullanılmaktadır.

- **Özellikler:** Zaman değişkeni analize dahil edilir. Sıcaklık dağılımı zamanla değişir.
- **Kullanım Alanları:** Isı şoklar, hızlı ısınma/soğutma, elektronik bileşenler.

$$T(t) = T_0 + \frac{q}{h \cdot A} * (1 - e^{-h \cdot t}) \quad (\text{Eşitlik 4})$$

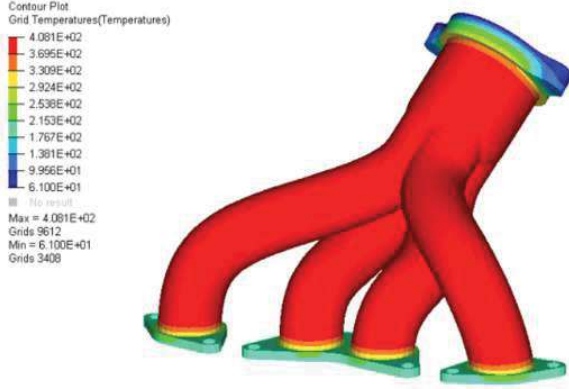
Bu eşitlik, zamanla değişen sıcaklık dağılımını göstermektedir.



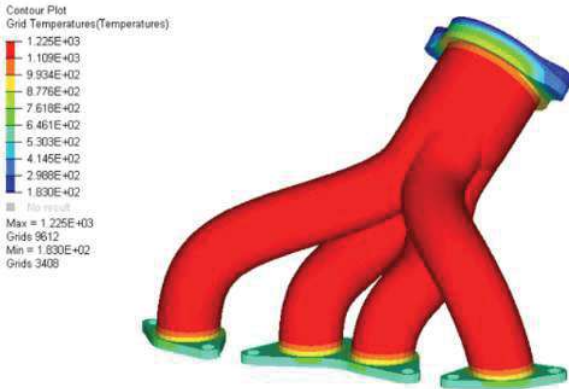
Şekil 8. Zamana Bağımlı Isı Analiz Örneği

4.3 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Isıl Analizler

Isıl analizler, doğrusal ya da doğrusal olmama durumlarını içerebilir. Doğrusal analizlerde, malzeme özellikleri ve sınır koşulları sıcaklıkla değişmez. Bu durum analizlerin daha basit olmasını sağlar. Ancak, doğrusal olmayan ısı analizlerde, malzeme özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değişir ve bu durum, analizin doğruluğunu artırmaktadır. Doğrusal olmayan analizler genellikle daha karmaşıktır, ancak daha gerçekçi sonuçlar üretmektedir.



Şekil 9. Doğrusal Olmayan Malzeme Tanımlaması İçeren Zamana Bağlı Isıl Analizin 0,5'inci Saniyesindeki Sıcaklık Dağılımı



Şekil 10. Doğrusal Olmayan Malzeme Tanımlaması İçeren Zamana Bağlı Isıl Analizin 1,0'inci Saniyesindeki Sıcaklık Dağılımı

5. SINIR KOŞULLARI VE YÜKLER

Isıl analizlerde, sınır koşulları ve yüklerin doğru bir şekilde tanımlanması, sonuçların doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. MSC Nastran, kullanıcıların çeşitli sınır koşulları ve ısı yükleri uygulamasına olanak tanır. Bu sınır koşulları ve yüklemeler, sistemin gerçek dünyadaki davranışını simüle etmeye yardımcı olmaktadır [9].

5.1. Sıcaklık Sınır Koşulları

Sıcaklık sınır koşulları, modelin belirli bölgelerine sabit veya değişken sıcaklıklar uygulayarak tanımlanmaktadır. Bu sınır koşulları; ısıtıcılar, soğutucular veya sabit sıcaklıkta çalışan elemanlar gibi çeşitli uygulamalar için kullanılabilir. Sabit sıcaklık sınır koşulları, belirli bir bölgedeki sıcaklığı belirli bir değerde tutarken, değişken sıcaklık sınır koşulları, zamanla değişen sıcaklıkları simüle etmek için kullanılır.

5.1.1 Sabit Sıcaklık

Belirli bir bölgeye sürekli sabit bir sıcaklık uygulanır. Örnek olarak belirli bir dereceye kadar ısıtma veya soğutma verilebilir.

5.1.2 Değişken Sıcaklık

Sıcaklık, zamana bağlı olarak değişir. Ayrıca frekansa bağlı da olabilmektedir. Bu veri çiftleri tablolar yoluyla modele tanımlanır.

Şekil 11. Patran Yazılımıyla Sabit ve Değişken Sıcaklığın Eklenmesini Temsil Eden İkon ve Değişkenler

5.1.3 Isı Akısı

Isı akısı, belirli bir yüzeyde birim alan başına uygulanan ısı miktarını belirtir. MSC Nastran'da, ısı akısı yükleri belirli bir bölgeye uygulanarak o bölgedeki ısı akısı simüle edilebilmektedir. Isı akısı, özellikle yüzeylerin ısıtılması veya soğutulması gereken uygulamalarda kullanılır.

Nastran'da ısı iletim analizleri yapılırken, örneğin, sabit sıcaklık veya ısı akısı gibi, malzemenin ısı iletkenlik değerleri ve sınır koşulları modele tanımlanır. Bu değişkenler, sistemin sıcaklık profili üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. MSC Nastran, düğüm (node) noktalarında sıcaklık değerlerini hesaplayarak sıcaklık dağılımını belirler.



Heat Flux

Nodal Area

Spatial Fields

Şekil 12. Patran Yazılımıyla Normal ve Yönlü Isı Akısının Eklennesini Temsil Eden İkon ve Değişkenler

$$q = \dot{Q}/A \quad (\text{Eşitlik 5})$$

5.1.4 Taşınım Yükleri

Taşınım (konveksiyon) yükleri, bir yüzeydeki ısı geçişini çevreleyen bir akışkana, taşınım yoluyla aktaran sınır koşullarıdır. Bu tür yükler, dış ortamla ısı alışverişini simüle etmek için kullanılır. Taşınım katsayısı, yüzey ile akışkan arasındaki ısı geçiş oranını tanımlar ve genellikle sistemin soğutma veya ısıtma verimini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Eşitlik 2 ile modellenmektedir.

MSC Nastran'da taşınım analizi yaparken; h : Taşınım katsayısı (W/m²·K) değeri, yüzey alanı ve akışkanın ortam sıcaklığı gibi parametreler tanımlanmalıdır. Bu sayede, taşınım ile gerçekleşen ısı transferi hesaplanabilmektedir [9].



Convection Coefficient

Ambient Temperature

Nodal Area

Şekil 13. Patran Yazılımıyla Taşınım Yüklerinin Eklennesini Temsil Eden İkon ve Değişkenler

5.1.5 Işınım Yükleri

Işınım, yüzeyler arasında elektromanyetik dalgalar yoluyla gerçekleşen ısı geçişidir. Işınım yükleri, özellikle yüksek sıcaklık farklarının olduğu sistemlerde etkili olmaktadır. MSC Nastran, kullanıcıların ısıtım yüklerini tanımlamasına olanak tanır ve bu süreç, Stefan-Boltzmann yasası kullanılarak Eşitlik 3 ile modellenmektedir.

MSC Nastran'da ısıtım analizi yaparken; ε : Yüzeyin salım katsayısı, yüzey alanı ve çevre sıcaklığı gibi değişkenler girilmelidir. MSC Nastran, bu veriler ışığında ısıtım yoluyla ısı geçişini hesaplar ve modelin sıcaklık dağılımına etkisini belirler [10].



Radiation

Emissivity

Absorptivity

Ambient Temperature

View Factor

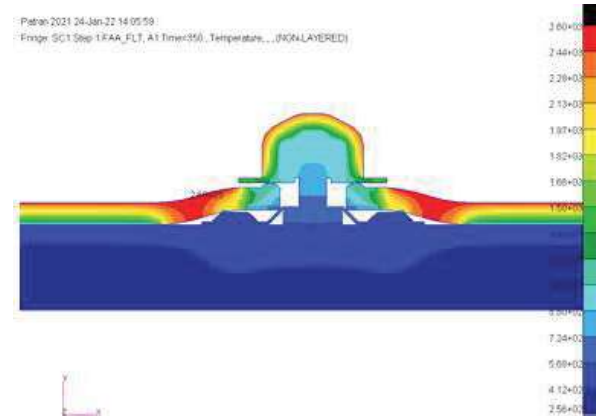
Nodal Area

* Temperature Function

* Temperature Function

Şekil 14. Patran Yazılımıyla Işınım Yüklerinin Eklennesini Temsil Eden İkon ve Değişkenler

MSC Nastran üzerinden yapılan ısıtım sınır şartı ile yapılmış ısı bir analizin sonuç ekranı Şekil 15'te paylaşılmıştır.



Şekil 15. Patran Yazılımıyla Işınım Yüklemeinin 350. Saniyesindeki Sıcaklık Değerleri

5.1.6 Başlangıç Yükleri

MSC Nastran'da, var olan yük grubuna bir başlangıç sıcaklığı tanımlanabilir. Bu durum ısı analizi yapılacak olan modelin, spesifik bir sıcaklıktan başlayarak ısıtılmasını veya soğutulmasını kapsar.

6. MSC NASTRAN VE PATRAN YAZILIMLARI İLE ISIL ANALİZ TANIMLAMALARI

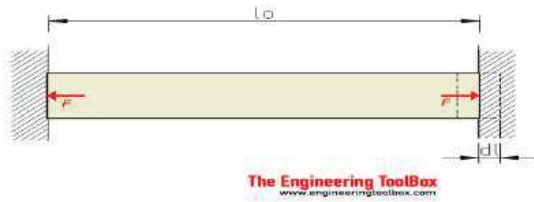
MSC Nastran ve Patran yazılımları ile çalışırken, ısı analizler için gerekli olan tanımlamalar, örnekler üzerinde anlatılacaktır [1], [2].

Isıl analizlerde kullanılan temel katsayılar, malzemelerin sıcaklık değişimlerine nasıl tepki verdiğinin anlaşılmasında yardımcı olmaktadır.

6.1. Isıl Genleşme Katsayısı

Isıl genleşme katsayısı, malzemelerin sıcaklık değişimlerine nasıl tepki verdiğin anlaşılmasında yardımcı olmaktadır. Isıl genleşme katsayısı, bir malzemenin sıcaklık değiştiğinde ne kadar genişlediğini veya büzüldüğünü göstermektedir. Bu katsayı, mekanik genleşmeyi doğru bir şekilde modellemek için yapılan ısı analizlerde kullanıldığından, özellikle ısıl gerilmelerin hesaplanmasında büyük önem taşır [11].

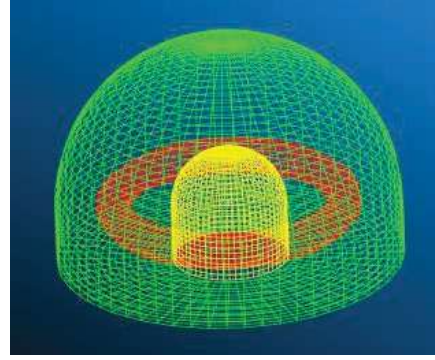
$$\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \text{ veya } \frac{1}{\text{K}} \quad (\text{Eşitlik 6})$$



Şekil 16. Isıl Genleşme Sonucunda Santigrat Derece veya Kelvin Başına Birim Uzunluk Değişimi

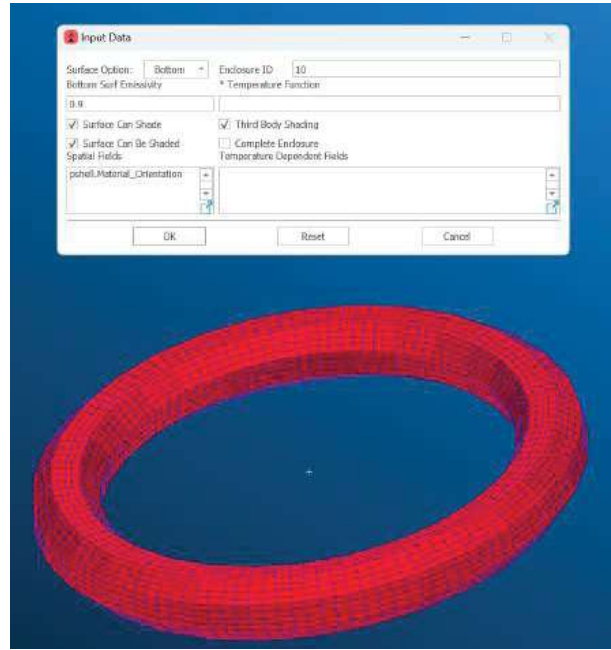
6.2. MSC Nastran ve Patran Yazılımları ile Farklı Yüzey Salım Katsayılarında Işınım Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

Örnek iş akışında, boşluklu bir lamba yapısındaki iç yarımküre ve dış kubbe arasındaki ısıtım düzeyi incelenmiştir. Dış kubbe 20 sıcaklığında taşınımına sahiptir.



Şekil 17. Örnek Çalışmanın Patran Arayüzündeki Görüntüsü

Lambanın dairesel yapısına Hacimsel Isı Oluşumu tanımlanması gerekmektedir. Bunun için Patran arayüzünde, "Load&BC's > Applied Heat (Element Uniform)" yolu izlenmiştir. 50'ye kadar ısıtma süreci modele tanımlanmıştır.



Şekil 18. Lamba Parçasına Patran Yazılımı ile Işınım Sınır Şartının Ekleneşi

Işınım sınır şartı lamba parçası dışındaki, iç ve dış kubbeye de eklenmiştir. İç kubbeye eklenen ısıtım sınır şartının yüzey salım katsayısı; 1.0 olarak belirlenirken, dış kubbeye eklenen ısıtım sınır şartının yüzey salım katsayısı; 0.4 olarak belirlenmiştir.



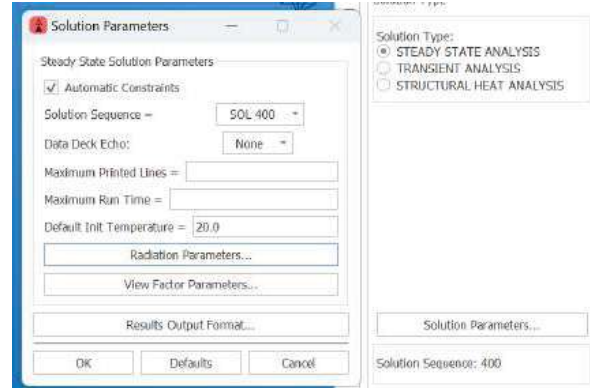
Şekil 19. Dış Kubbeye Patran Yazılımı ile Taşınım Sınır Şartının Eklenmesi

Şekil 19'da dış kubbe parçasına taşınım tanımlaması yapılmıştır. 20'lik tanımlama ve gerekli ısı formülasyonu seçimi yapılmıştır.

Analizde kullanılacak modelin sınır şartı tanımlamaları bu adımda tamamlanmıştır.

Isıl analizler, ilgili ayarla çıktı dosyaları oluşturularak sürdürülmüştür. Analiz ayarlamaları, ana sekmelerden "Analysis > Entire Model" sekmesine gidilerek yapılmıştır.

Yapılacak analizin türü, zamandan bağımsız olup, durağan (Steady-State) olmasından ötürü; "Solution Type" çözüm seçeneği "Steady-State-Analysis" olarak seçilmiş ve değişken ayarlamaları yapılmıştır. Çözüm algoritması olarak SOL400 seçilmiştir. Başlangıç sıcaklık değeri olarak ise 20 alınmıştır.



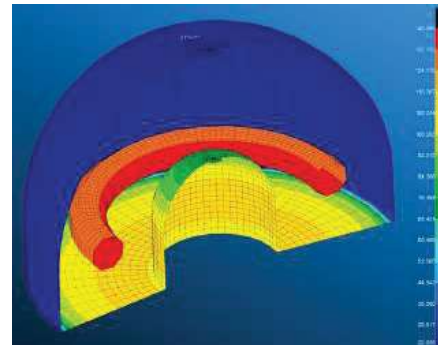
Şekil 20. Analiz Türünün, Çözüm Algoritmasının ve Başlangıç Sıcaklık Değerinin Tanımlanması

Işınımın gerçekleşebilmesi için; sıcaklık dağılım göstergesinin ve Stefan-Boltzmann sabitinin tanımlanması gerekmektedir. Mutlak sıcaklık için, "273,15 Degree Celcius" (0 Kelvin) seçilmiştir. Stefan-Boltzmann sabiti değeri için, "WATTS/M2/K4 formülasyonunda 5,69E-12 değeri seçilmiştir.



Şekil 21. Mutlak Sıcaklık Değerinin ve Stefan-Boltzmann Sabitinin Tanımlanması

Analizden önce yapılması gereken tüm tanımlamalar yapıldıktan sonra, model dosyası analiz edilmek üzere MSC Nastran'a gönderilmiştir. MSC Nastran girdi dosyası olarak, kurulan model içeriğini kapsayan bir girdi dosyası belirtilmiştir. Bu dosyanın uzantısı .bdf (Bulk Data File)'dir.



Şekil 22. Patran'da Sıcaklık Dağılımının Yarı Model Üzerinden İncelenmesi



Şekil 23. Patran'da Toplam Işınım Isı Akısının Yarı Model Üzerinden İncelenmesi

7. SONUÇ

Bu yazıda anlatılan çalışmada, ısı analizlerin mühendislik benzetimlerinde (simülasyonlarında) nasıl uygulanabileceğini gösteren kapsamlı bir örnek üzerinden ilerlenmiştir. Bir lamba modeli üzerinden yürütülen analizlerde, farklı yüzey salım (emisyon) katsayılarında ısı sınır koşulları eklenerek, bu koşulların sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Isıl yüklerin yapısal modele nasıl bütünlleştirileceği (entegre edilebileceği) ayrıntılandırılarak, bu süreçte kullanılan sonlu elemanlar yöntemiyle analizlerin doğruluğunu artıran etkenler incelenmiştir.

Örnekte kullanılan iletim, taşınım ve ısıtım biçimleri, mühendislik benzetimlerinde ısı yüklerin sistem davranışına nasıl yansıdığını anlamak açısından önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu analizlerin çıktıları, sıcaklık dağılımı, ısı genleşme ve ısı gerilme gibi kritik değerleri ortaya koyarken, ısı modellemenin farklı salım katsayılarına duyarlılığını ve gelecekteki benzer projelerde yapılabilecek iyileştirme alanlarını da belirlemeye yardımcı olmuştur.

Böylelikle, mühendislerin ısı yüklerin etkisini daha iyi değerlendirmesi ve çeşitli mühendislik problemlerine yönelik daha etkin çözüm yöntemleri geliştirmesi olanaklı hale gelmiştir.

8. KAYNAKÇA

- [1] 2024, MSC Nastran Quick Reference Guide, NA:V2024.2.Z:Z:DC-QRG-PDF, 2024.2, <https://hexagon.com/>, 16.07.2025
- [2] 2024, MSC Nastran Thermal Analysis User's Guide, NA:V2024.2.Z:Z:DC-THER-PDF, 2024.2, <https://hexagon.com/>, 16.07.2025
- [3] Kanetkar, S. 2023 SimAcademy Webinar Archive: "Advanced Thermal Analysis in MSC Nastran Using SOL400", <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/simacademy-webinar-archive--advanced-thermal-analysis-in-msc-nastran-using-sol400-wm164>, 19.06.2025
- [4] 2024, "Chaining Thermal and Structural Analysis with MSC Nastran & MSC Patran", <https://www.solidsolutions.co.uk/blog/2024/04/chaining-thermal-and-structural-analysis-with-msc-nastran-msc-patran/>, 19.06.2025
- [5] Emery, A. F. ve Carson, W. W. 1969. "An Evaluation of the Use of the Finite Element Method in the Computation of Temperature." Sandia Laboratuvar Raporu SCL-RR-69-83
- [6] Richardson, P. D. ve Shum, Y. M. 1969. "Use of Finite Element Methods in Solution of Transient Heat Conduction Problems." Amerikan Makine Mühendisleri Derneği
- [7] Yalamanchili, R. V. S. ve Chu, S. C. 1970. "Finite Element Method Applied to Transient Two-Dimensional Heat Transfer with Convection and Radiation Boundary Conditions." ABD Ordusu Silah Komutanlığı Teknik Raporu RE70-165.
- [8] Zienkiewicz, O. C. 1967. "The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics" McGraw-Hill Publishing Company Limited, New York, 58-164
- [9] Abbey, T. 2014. "How to Use FEA for Thermal Analysis", DigitalEngineering247
- [10] Hemanth, J. 2018. "Finite Element Analysis (FEA) and Thermal Gradient of a Solid Rectangular Fin with Embossing's for Aerospace Applications", Presidency University, Bangalore, India

DIŞLI TASARIMINDA MİKRO GEOMETRİ DÜZENLEMELERİ VE OPTİMİZASYONU

Eren MORGİL¹

1. GİRİŞ

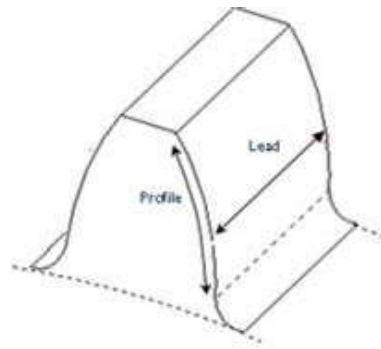
Dişli çarklar endüstride en çok kullanılan güç aktarma organı olarak karşımıza çıkmaktadır [1]. Bu sistemlerin verimli çalışabilmesi için mikro geometri düzenlemelerinin yapılması büyük bir önem taşır. Mikro geometri, dişli profillerindeki küçük, hassas değişiklikleri tanımlar ve bu değişikliklerin dişli verimi üzerinde önemli etkileri vardır. Mikro geometri tasarımı hem dişli dayanımını hem de titreşim-akustik-sertli (NVH – Noise, Vibration, Harshness) kalitesini etkileyen önemli bir olgudur [2].

Bu yazıda, dişlilerdeki mikro geometri düzenlemeleri yapılarak optimizasyon süreçleri incelenmiş, bu süreçlerin dişli tasarımındaki rolü ve yazılımlar yardımıyla nasıl daha verimli hale getirilebileceği açıklanmıştır. Ayrıca, mikro geometri değişikliklerinin dişli verimine olan katkıları ve yazılım tabanlı optimizasyon yöntemleri de ele alınmıştır.

2. MİKRO GEOMETRİ NEDİR?

Mikro geometri, dişli çarklarının diş yüzeyindeki küçük ölçekli değişiklikleri belirtir. Dişli profillerinde yapılan bu ince düzeltmeler, dişlilerin çalışma koşullarına daha iyi uyum sağlamasında rol oynar. Mikro geometri değişiklikleri veya düzenlemeleri, dişlilerin daha sessiz çalışmasını, aşınmanın

azalmasını ve verimliliğin artmasını sağlamak amacıyla yapılır. Dişli profillerindeki bu değişiklikler genellikle dişlerin eğim açısı, yüzey pürüzlülüğü ve diş uzunluğu gibi parametreleri kapsar. Mikro geometri değişiklikleri üç farklı tipte incelenebilmektedir [3]:



Şekil 1. Diş Profiline Gösterimi [3]

- Piyasada evolvent ("involute") profil olarak tanımlanan sarmal diş eğrisi değişiklikleri, diş dibinden ("root") diş ucuna ("tip") doğru yapılır ve böylece kullanıcının elastik şekil değiştirmeleri, dökmeden ("casting") kaynaklı hataları, ısı işlem ve montaj hatalarını hesaba katmasını sağlamaktadır.

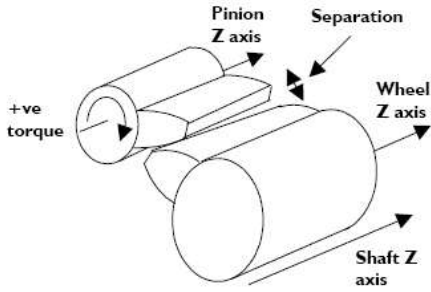
¹ Kıdemli Mekanik Simülasyon Mühendisi, emorgil@bias.com

- Dişli yan yüzeyi ("lead") değişiklikleri, dişlinin yanak genişliği boyunca uzanan eğimin ("lead slope") düzeltilmesi ve dişli yanak bombesinin ("lead crowning") uygulanmasını içermektedir.
- Bias olarak adlandırılan diş yüzeyinin eğikliği, üretim sürecinde eklenebilen bükülmeyi ifade etmektedir.

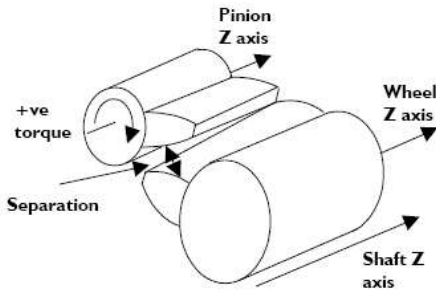
2.1. Dişli Hizalama Hatası

Dişli temas hizalama hatası ("gear mesh misalignment"), dişli çarklarının dişlerinin doğru bir şekilde birbirine oturmaması durumudur [3]. Bu hata, dişli çarklarının eksenlerinin ya da diş profillerinin uyumsuz olmasından kaynaklanabilir. Hizalama bozukluğu, dişli çarklarının verimli çalışmasını engelleyebilir, aşınmayı hızlandırabilir ve sistemde istenmeyen titreşim ve gürültülere neden olabilir.

Aktif diş yanakları arasındaki ayrım, dişlinin lokal Z eksenine doğru arttığında pozitif hizalama hatası olarak tanımlanabilmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Dişlilerdeki Pozitif Ayrılma Durumu [3]

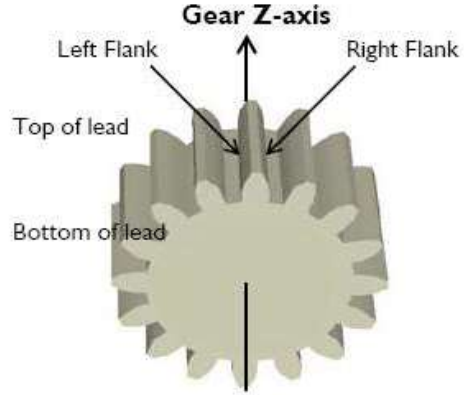


Şekil 3. Dişlilerdeki Negatif Ayrılma Durumu [3]

Aktif yanaklar arasındaki ayrım, dişlinin lokal Z eksenine doğru azaldığında ise negatif hizalama hatası olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3).

2.1.1. Diş Yanaklarının Tanımlanması

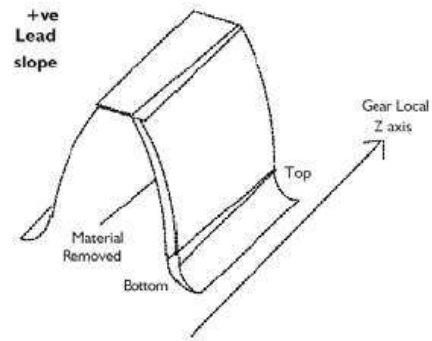
Bir dişli, dişli derecelendirmesindeki (gear rating) temas hasarının toplamı, topoloji modifikasyonu (parçanın geometrik yapısında, özellikle yük taşıyan yüzeylerinde yapılan değişiklikler) ve ölçümü için, dişliye sabitlenmiş bir lokal Z eksenine sahiptir. Bu lokal Z eksenini montaj yönünden bağımsız olarak sabit kalır. Şekil 4'de görülebileceği gibi lokal Z eksenini boyunca pozitif yönde bakıldığında, sağ yanak her zaman Z ekseninin sağında ve sol yanak her zaman solundadır.



Şekil 4. Sağ ve Sol Diş Yanaklarının Tanımlanması [3]

2.1.2. Diş Yanak Profiline Eğim ("Lead Slope")

Diş yanak profiline eğim, dişli yüzey genişliği boyunca (lokal Z eksenini) yanak profiline gerçekleştirilen düzenlemeleri tanımlar.

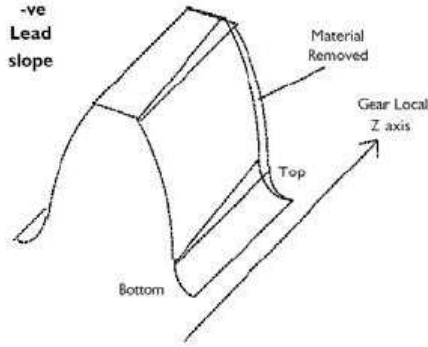


Şekil 5. Pozitif Diş Yanak Profili Eğimi [3]

Eğim değerinin pozitif olduğu durum Şekil 5'te gösterilmektedir. Diş yanağındaki eğime ait değerin pozitif olması, diş yanağının üst kısmı sabit kalırken, alt kısmından malzeme kaldırıldığını ifade etmektedir.

Eğim değerinin negatif olduğu durum Şekil 6'da gösteril-

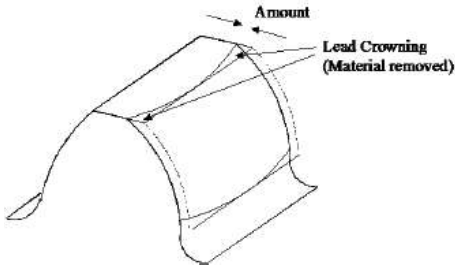
mehtedir. Diş yanağındaki eğime ait değerin negatif olması, diş yanağının alt kısmı sabit kalırken, üst kısmından malzeme kaldırıldığını göstermektedir.



Şekil 6. Negatif Diş Yanak Profili Eğimi [3]

2.1.3. Diş Yanak Profilineki Bombe ("Lead Crowning")

Diş yanağındaki bombe, diş yanağının yüzey genişliği boyunca yuvarlatılması nedeniyle yapılan diş düzenlemelerini tanımlar.



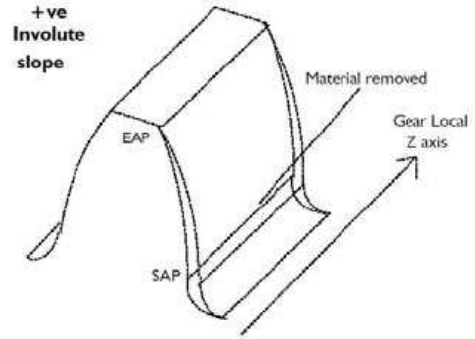
Şekil 7. Diş Yanak Profilineki Bombe [3]

Bu değerin pozitif olması, yanağındaki alt ve üst kısımlarından malzeme kaldırıldığını, orta kısmın ise sabit kaldığını gösterir.

2.1.4. Evolvent Eğim ("Involute Slope")

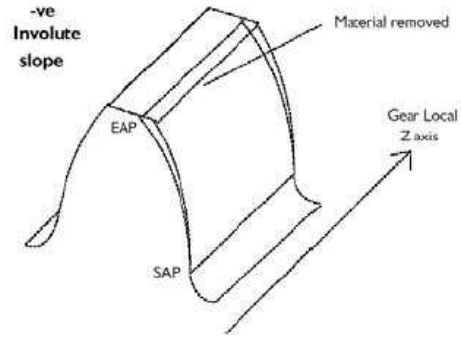
Evolvent eğim, dişli kökünden ucuna kadar olan evolvent profilineki eğim değerini tanımlar.

Pozitif evolvent eğim, alt bölgede ("start of active profile") kaldırılan malzemeyi gösterirken, üst bölgenin ("end of active profile") sabit kaldığını belirtir (Şekil 8).



Şekil 8. Pozitif Evolvent Eğimi [3]

Negatif evolvent eğim, üst bölgeden malzeme kaldırılırken alt bölgenin sabit kaldığını gösterir (Şekil 9).



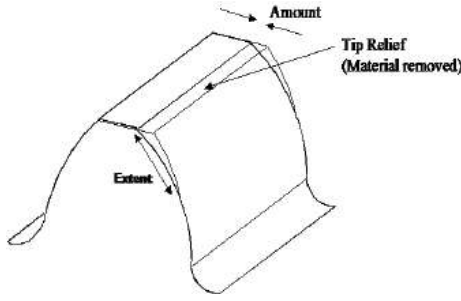
Şekil 9. Negatif Evolvent Eğimi [3]

2.1.5. Evolvent Profilineki Bombe ("Involute Barrelling")

Evolvent profilineki bombe değerin pozitif olması, aktif profilin başlangıcından ve sonundan malzeme kaldırılırken orta kısmın sabit kaldığını belirtir. Değerin negatif olması, kaldırılan malzemenin profilin orta kısmından gerçekleştiğini belirtir.

2.1.6. Uç Boşaltma ("Tip Relief")

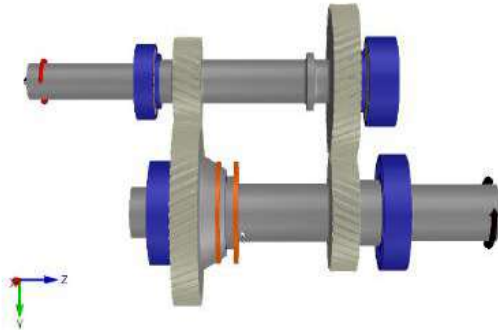
Uç boşaltma, dişin uç kısmından yanağı yönünde, yanağı genişliği boyunca diş köküne doğru malzeme kaldırıldığını belirtir (Şekil 10).



Şekil 10. Uç Boşaltma [3]

3. ROMAX – DIŞLI MİKRO GEOMETRİ DÜZENLEMELERİ VE ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde mikro-geometri değişikliklerinin dişliler üzerindeki yük ve gerilme dağılımına olan etkisini göstermek amacıyla örnek bir analiz yapılmıştır. Analizde kullanılan dişli kutusu; iki mil, iki dişli çifti, dört rulman ve bir kavramadan ("clutch/synchroniser") oluşmaktadır. Mikro-geometri analizi için iki farklı hız yapılandırması olan Şekil 11'de gösterilen dişli kutusunun solunda yer alan düşük hız dişlilerinin çalıştığı bir durum seçilmiştir.



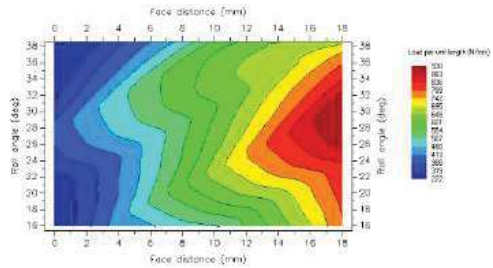
Şekil 11. Mikro Geometri Analizi Yapılan Dişli Kutusu

Giriş mili hızı ve yük durumu süresinin, mikro geometri analizinde hiçbir etkisi yoktur, ancak tork koşulları oldukça önemlidir. Bu örnekte yük durumları, 400 Nm giriş torkunun %20, %40, %60, %80 ve %100'ü olarak tanımlanmıştır. Yükleme durumunu ("load case") tanımlamak amacıyla farklı çalışma sürelerinde giriş miline 3000 dev/dk'lık hız girdi olarak sağlanmıştır (Şekil 12).

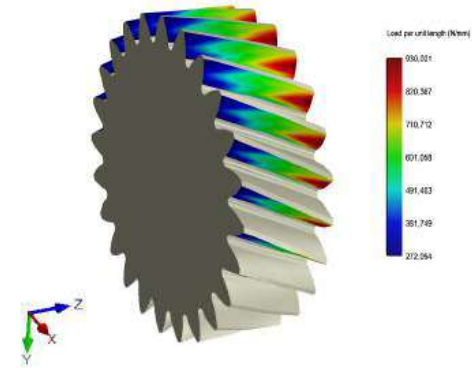
Name	Duration (hrs)	Temperature (C)	Speed (rpm)	Torque (Nm)	Power (kW)	Speed (rpm)	Torque (Nm)	Power (kW)
100% Low Speed	20.0000	70.000	3000	400.000000	122.4637	-1350	863.32323	-125.8637
20% Low Speed	10.0000	70.000	3000	80.000000	25.1227	-1350	176.66666	-25.1227
40% Low Speed	20.0000	70.000	3000	160.000000	50.2454	-1350	353.33333	-50.2454
60% Low Speed	30.0000	70.000	3000	240.000000	75.3681	-1350	529.99999	-75.3681
80% Low Speed	40.0000	70.000	3000	320.000000	100.5308	-1350	705.66666	-100.5308

Şekil 12. Yükleme Durumları ("Load Cases")

Belirtilen yükleme altında statik analiz tamamlandıktan sonra Romax'ın FBetaX aracıyla hesaplanan dişli hizalama hatası -28.46 μm 'dir. Dişli hizalama hatasından kaynaklı dişler üzerinde ortaya çıkan, düşük hız pinyon dişlisinin mikro geometrisinde herhangi bir değişiklik yapılmadan önce, üzerindeki yük ve stres dağılımlarını görmek amacıyla mikro geometri analizleri yapılmıştır (Şekil 13).

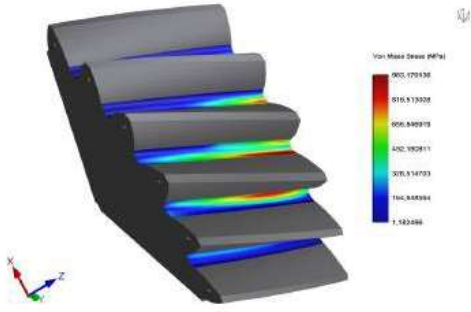


Şekil 13. Pinyon Dişlisi İçin Yükleme Dağılımı



Şekil 14. Pinyon Dişlisi Üzerindeki Birim Uzunluk Başına Düşen Yük Dağılımı

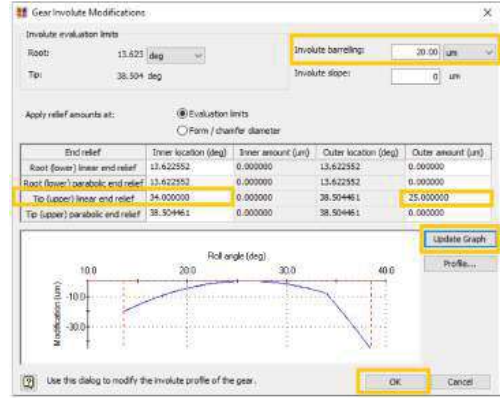
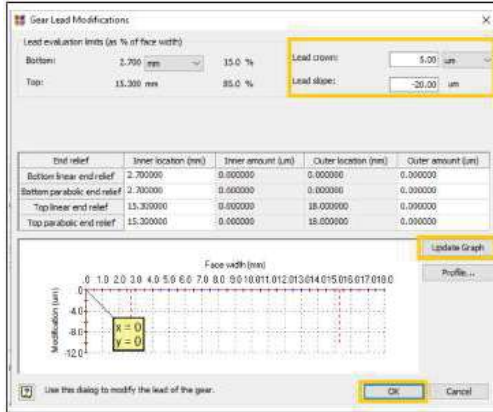
Yük dağılımları, helis açısından kaynaklı belirli bölgelere yoğunlaşmıştır (Şekil 14). Diş üzerinde 930 N/mm'ye çıkan değerler görülebilmektedir. Diş üzerindeki yük dağılımlarının yanında diş köklerindeki Von Mises gerilmeleri de incelenmiştir ve sonuçlar Şekil 15'te gösterilmiştir. Diş köklerinde de Von Mises gerilmelerinin 983 MPa'ya kadar çıktığı görülmektedir.



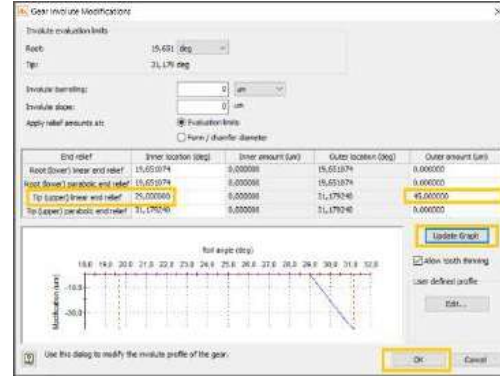
Şekil 15. Pinyon Dişli İçin Kök Gerilmeleri

İlk sonuçlar incelendiğinde, helis açısından kaynaklı yüklerin dişli ucunda toplandığı gözlemlenmiştir. Bu yükleme dağılımı, öngörülen yorulma hasarının daha erken ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Yük dağılımını, dişli yanığının merkez bölgesine dağıtmak için, mikro geometri düzenlemeleri uygulanabilir ve dişlilerin yük taşıma kapasiteleri iyileştirilebilir.

Mikro geometri değişiklikleri yapılırken üretim toleranslarını da göz önünde bulundurarak dişlilerin yanak ve evolvent profillerinde küçük değişiklikler yapılabilmektedir. Çalışma kapsamında, yükte olan dişli yanakları için mikro geometri değişiklikleri yapılarak Şekil 16 ve Şekil 17'de gösterilmiştir.

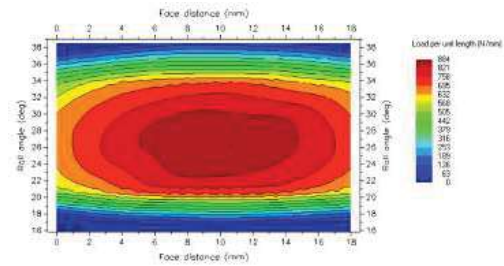


Şekil 16. Pinyon Dişlisi İçin Uygulanan Mikro Geometri Değişiklikleri

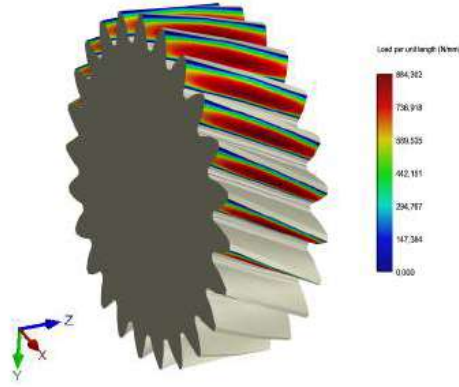


Şekil 17. Çark Dişlisi İçin Uygulanan Mikro Geometri Değişiklikleri

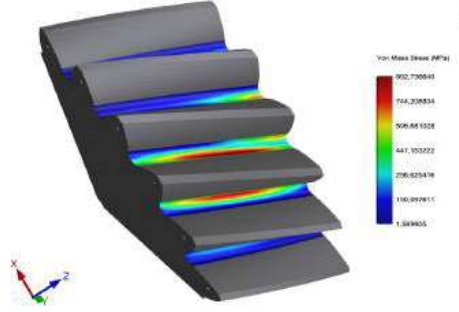
Yapılan mikro-geometri değişikliklerinin etkisini görmek amacıyla analiz tekrarlanmıştır. Pinyonun dişleri üzerindeki yük dağılımları Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20'de gösterilmiştir.



Şekil 18. Mikro Geometri Değişikliği Yapılmış Pinyon Dişlisi İçin Birim Uzunluk Başına Düşen Yük Dağılımı



Şekil 19. Mikro Geometri Değişikliği Yapılmış Pinyon Dişlisi Üzerindeki Birim Uzunluk Başına Düşen Yük Dağılımı



Şekil 20. Mikro Geometri Değişikliği Yapılmış Pinyon Dişlisi İçin Kök Gerilmeleri

Yapılan mikro geometri değişikliklerinin sonucu olarak birim uzunluk başına düşen en fazla yük dağılımı değeri 884 N/mm'ye düşürülmüştür. Bununla beraber, diş köklerindeki maksimum Von Mises gerilme değeri 892 MPa'ya düştüğü gözlemlenmiştir.

4. SONUÇ

Dişli tasarımında mikro geometri modifikasyonlarının önemi büyüktür. Bu değişiklikler, dişli çarklarının verimliliğini artırmak, aşınma ve yıpranmayı azaltmak, gürültü ve titreşimi engellemek gibi birçok yarar sağlar [3]. Yazılım tabanlı optimizasyon yöntemleri, bu değişikliklerin etkilerini irdelemek ve en uygun çözümü bulmak için etkili araçlar sunmaktadır. Mikro geometri değişiklikleri, dişli sistemlerinin başarımını yükselterek daha uzun ömürlü, daha verimli ve daha sessiz sistemler elde edilmesine olanak tanır.

Bu çalışmada yalnızca mikro-geometri değişikliklerinin yük ve gerilme dağılımı üzerindeki etkisini göstermek amaçlanmış olup mikro-geometri değişiklikleriyle birlikte diş üzerindeki yük dağılımı daha düzgün bir hale getirilerek en yüksek yükleme değeri dişli yanağı ve kökü için düşürülmüştür.

KAYNAKÇA

1. Doğan O., ve Kamer M.S., 2021, Eklemeli İmalat Yöntemi ile Optimum Düz Dişli Çark Tasarımı ve Üretimi, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi
2. Platten, M.F., Blockley, C.J., James, B.M., Prabakaran, S.M. ve Scott, D.J. 2008, Improving Gear Microgeometry to Improve Motion Performance
3. Romax Enduro Tutorial Pack, G1: Gear Micro Geometry Analysis
4. Romax Enduro Tutorial Pack, G3: Micro Geometry Optimization
5. Romax Software 2024.1 Help Documentation
6. Hexagon Nexus Documentation Center, Romax Software, <https://nexus.hexagon.com/home/product/romax-suite/> , 2025.