

Okan Üniversitesi MYO

MUTK216

TAHRİBATSIZ MALZEME MUAYENESİ

Ders Yürütücüsü:

Öğr. Gör. Eren Kayaoğlu

eren.kayaoglu@okan.edu.tr

DERS 9

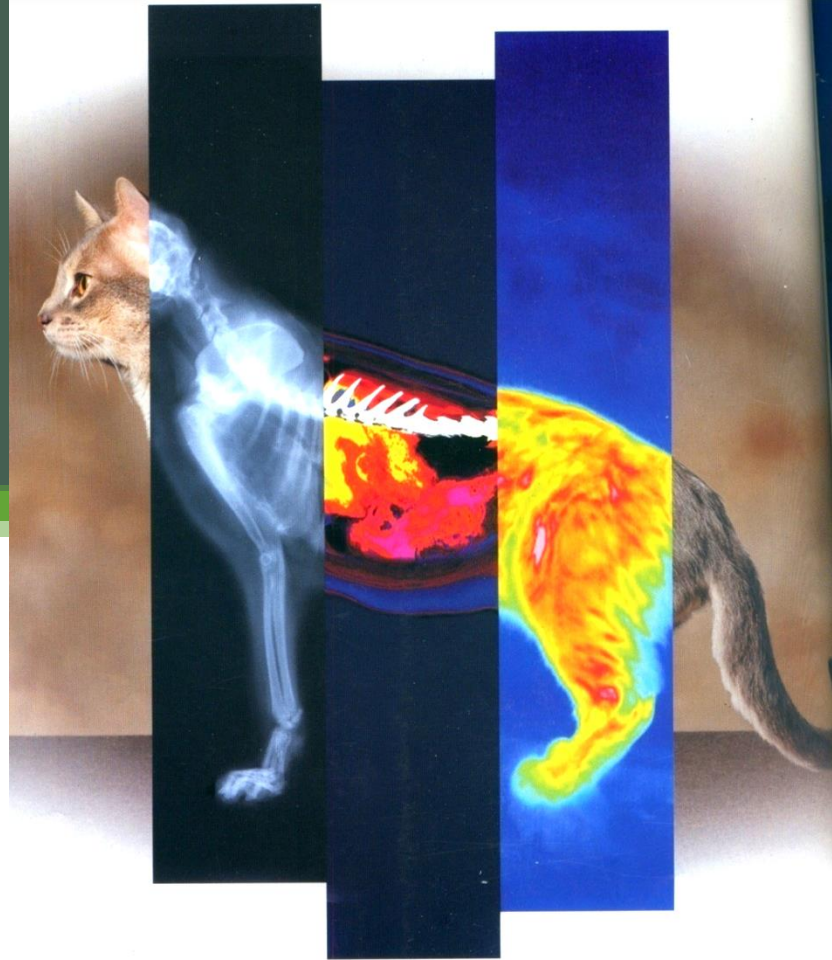
MUTK216 – Tahribatsız Malzeme Muayenesi

Ders Sunumları (.pdf) + Kaynaklar

<http://okanuni.eren.xyz>

Web adresinden indirebilirsiniz.

MUTK216 – Tahribatsız Malzeme Muayenesi



Zarar vermeden incele veya ölç!

MUTK216 – Tahribatsız Malzeme Muayenesi

Termografi, Radyografi, 3B Tarama ...

**Elektromanyetik Dalga (Işık, Işınım ve Türevleri)
Esaslı Muayene Teknikleri**

MUTK216 – Tahribatsız Malzeme Muayenesi

TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

~~Görsel Muayene~~

~~Akustik Emisyon~~

~~Penetrant Sıvı~~

Termografi

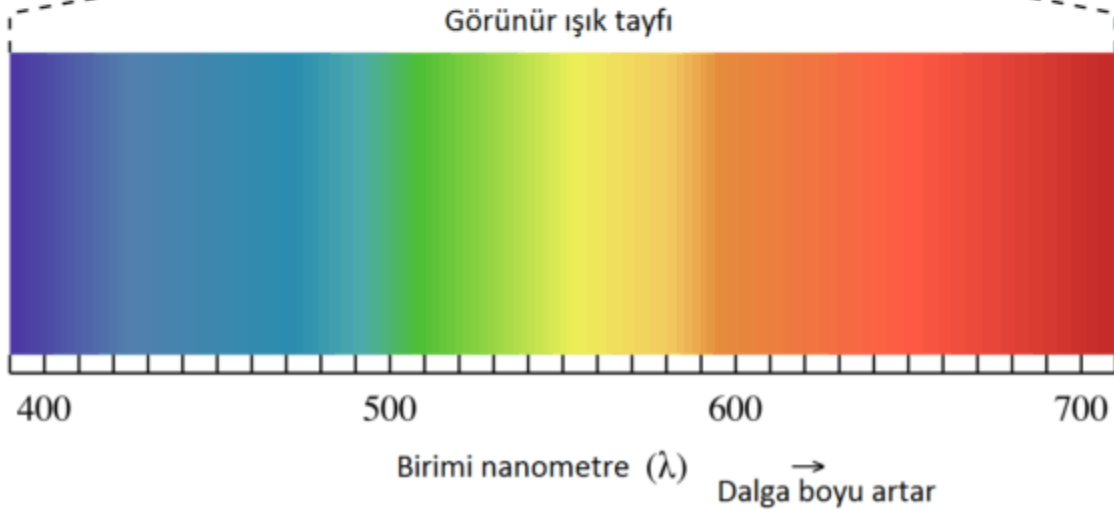
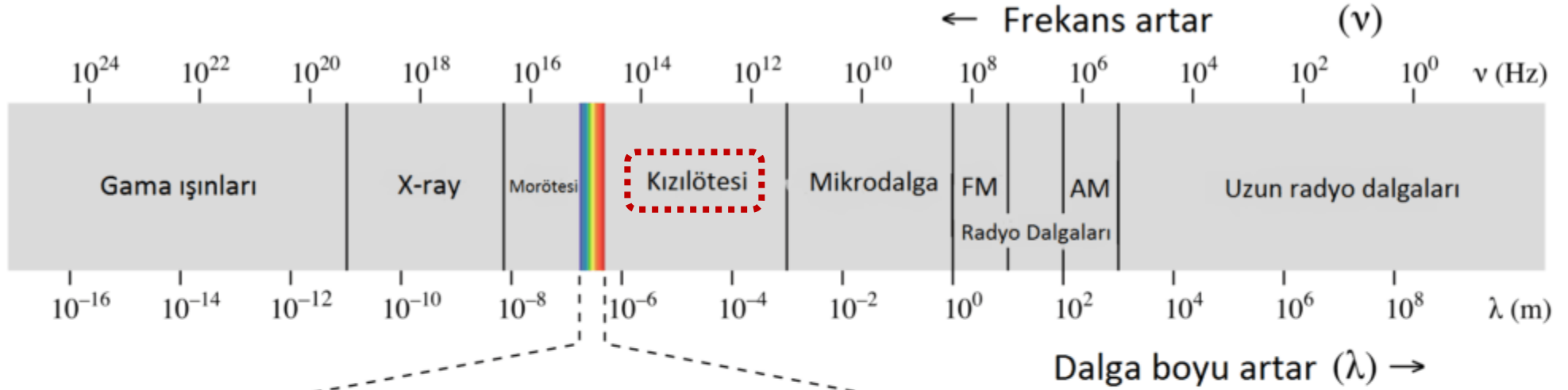
~~Radyografi~~

Girdap Akımları

Manyetik Parçacık

~~Ultrasonik Muayene~~

Termografi / Kızılötesi Işınım ile Muayene



TEMEL KAVRAMLAR: **Kızılötesi (Kırmızı ötesi)**

- **Fiziksel Temel:** Kırmızı ötesi ışınlar da morötesi (ultraviyole) ışınlar gibi gözle görünmeyen ışınlar sınıfına girer. Morötesi ışınlar küçük, **kırmızı ötesi** ışınlar **büyük dalga boyundadır**.

Morötesi <<< | <<< **Görünen Işık** >>> | >>> **Kızılötesi**



TEMEL KAVRAMLAR: **Kızılötesi (*infrared*)**

- **Fiziksel Temel:**

Kırmızı ötesi 0,7 μm dalga boyundan başlayarak 1000 μm = 1 mm'ye kadar devam eden ışınlardır. Bu ışınların sıcaklık iletim özellikleri yüksek olduğundan **termal radyasyon** olarak da adlandırılırlar.

Morötesi <<< | <<< **Görünen Işık** >>> | >>> **Kızılötesi**



TEMEL KAVRAMLAR: **Kızılötesi**

- **Fiziksel Temel:** Metodun fiziksel temeli ‘Mutlak sıcaklığın (-273°C) üzerindeki bir sıcaklığa sahip her cisim ısı radyasyon yayınlar’ prensibine dayanmaktadır.
- Stefan-Boltzmann yasasına göre, bir cismin ışınım yoluyla yayınladığı ısı radyasyon, yüzey mutlak sıcaklığının dördüncü kuvveti ile orantılıdır.

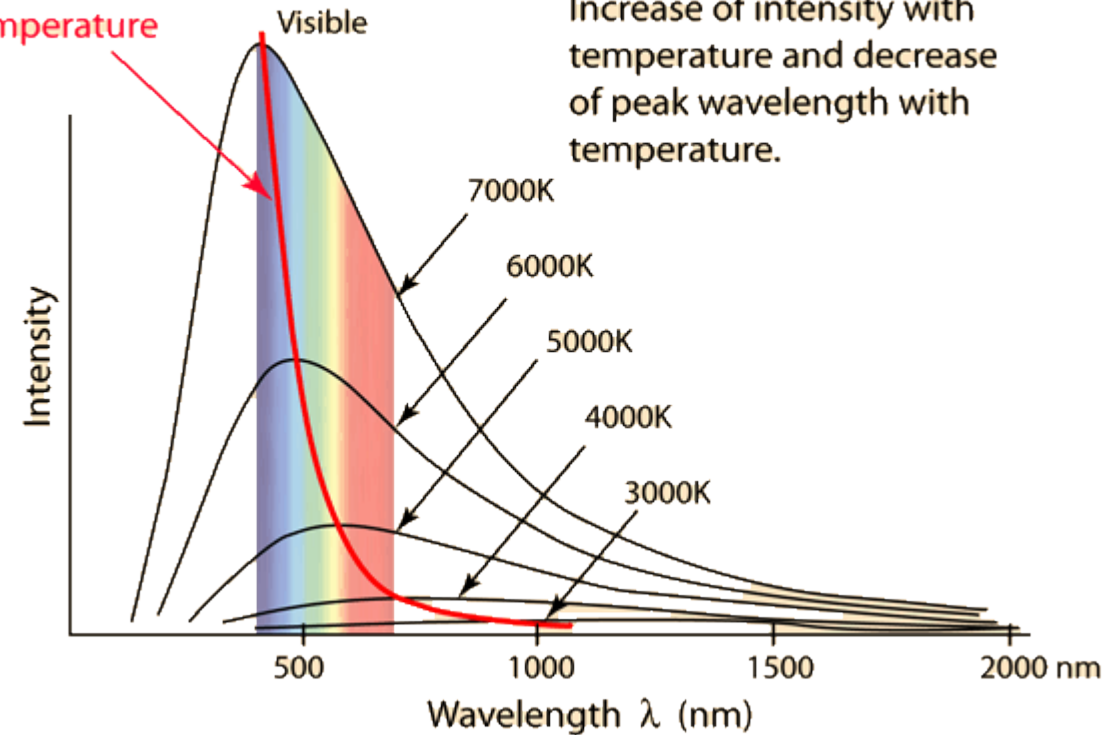
$$Q = W \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

- W: ısı radyasyon, ϵ : emisyon katsayısı, σ : Stefan-Boltzmann katsayısı (Watt/cm²K), T: mutlak sıcaklık
- Emisyon katsayısı siyah cisimler için 1’dir. Gri cisimler için ise <1’dir.

TEMEL KAVRAMLAR: Kızılötesi

- **Fiziksel Temel:** Bir ısı radyasyon kaynağı, çok sayıda dalga boyuna sahip bir ışınım demeti gönderir. Demete asıl karakterini veren dalga boyu, maksimum dalga boyu λ_{max} olarak adlandırılır. Örneğin, 300 °K sıcaklığındaki cismin ısı radyasyonu için $\lambda_{max} = 9,8$ nm'dir (nanometre), $f_{max} = 17,6$ THz.
- Bir ışınım demetinin λ_{max} 'ı ölçülebilirse, cismin yüzey sıcaklığı hesaplanabilir. Isıl radyasyonun getirdiği foton enerjisi (E) foton dedektörleri ile ölçülür ve $\lambda_{max} = 12,4/E$ bağıntısından hesaplanır.
- Kızılötesi radyasyonun algılanabilmesi ancak katı hal dedektörlerinin (*Solid State Detectors*) bulunmasından sonra mümkün olmuştur.

Decrease of λ_{peak} with increase in temperature





TEMEL KAVRAMLAR: Kızılötesi

- **Kızılötesi (kızılaltı, infrared, infraruj veya IR)** ışınım, dalga boyu görünür ışıktan uzun, fakat terahertz ışınımından ve mikrodalgalardan daha kısa olan elektromanyetik ışınımıdır.
- Kırmızı, görünür ışığın en uzun dalga boyuna sahip rengidir. **Kızılötesi ışınımın dalga boyu 750 nanometre ile 1 milimetre (0,78 – 1000 μm) arasındadır.** Normal sıcaklıktaki insan vücudu 10 mikrometre dalga boyu civarında ışıma yapar.
- Doğrudan alınan Güneş ışığı %47 kızılötesi, %46 görünür ışık ve %7 morötesi ışınımından oluşur.
- İngilizce *infrared* sözcüğü, Latince "aşağı" veya "ötesi" anlamına gelen *infra* ile İngilizce "kırmızı" anlamına gelen *red* kelimelerinden oluşur ve "kırmızıaltı" veya "kırmızıötesi" anlamına gelir.

Kızılötesi

Uygulama Alanları: Kızılötesi görüntüleme hem sivil hem de askeri kullanım alanları bulmuştur:

- Hedef tespiti, gözlemlene, gece görüşü, güdüm ve takip sistemleri gibi askeri ve savunma sistemlerinde kullanım.
- Isıl verimlilik analizi, **uzaktan sıcaklık ölçme**, kısa mesafeli kablosuz iletişim, **spektroskopi** ve hava tahmini gibi alanlarda da kullanılmaktadır.
- Kızılötesi astronomi, algılayıcılarla donatılmış teleskoplar kullanarak uzayın normal teleskoplarla, moleküler bulutlar gibi uzay tozları yüzünden görüntülenemeyen alanlarını görüntüleme vb.

Kızılötesi / Termografi Nedir?

- Kızılötesi ışıınımdan faydalanarak cisimlerin sıcaklığını uzaktan belirleme.
- **Kızılötesi ışıını her sıcaklıktaki cisim tarafından yayınlandığından** termografi sayesinde hiç ışık olmaksızın bütün ortamı görmek mümkündür.
- Bir cismin yaydığı kızılötesi ışıını miktarı sıcaklıkla birlikte arttığından, **termografi sıcaklık farklarını da görmeyi sağlar.**
 - Termografi (veya termal görüntüleme) genelde askeri ve endüstriyel amaçlarla kullanılsa da üretim maliyetlerinin düşmesiyle **kızılötesi kameralar** şeklinde tüketici pazarına da girmiş bulunmaktadır.
 - Kaçak yapan tesisatlar veya elektriğin ısıtma etkisi termografi ile bulunup olası sızıntı ve yangınlar önlenabilir.

MUTK216 – Tahribatsız Malzeme Muayenesi

Termografi (*Thermography / Thermal Imaging*)

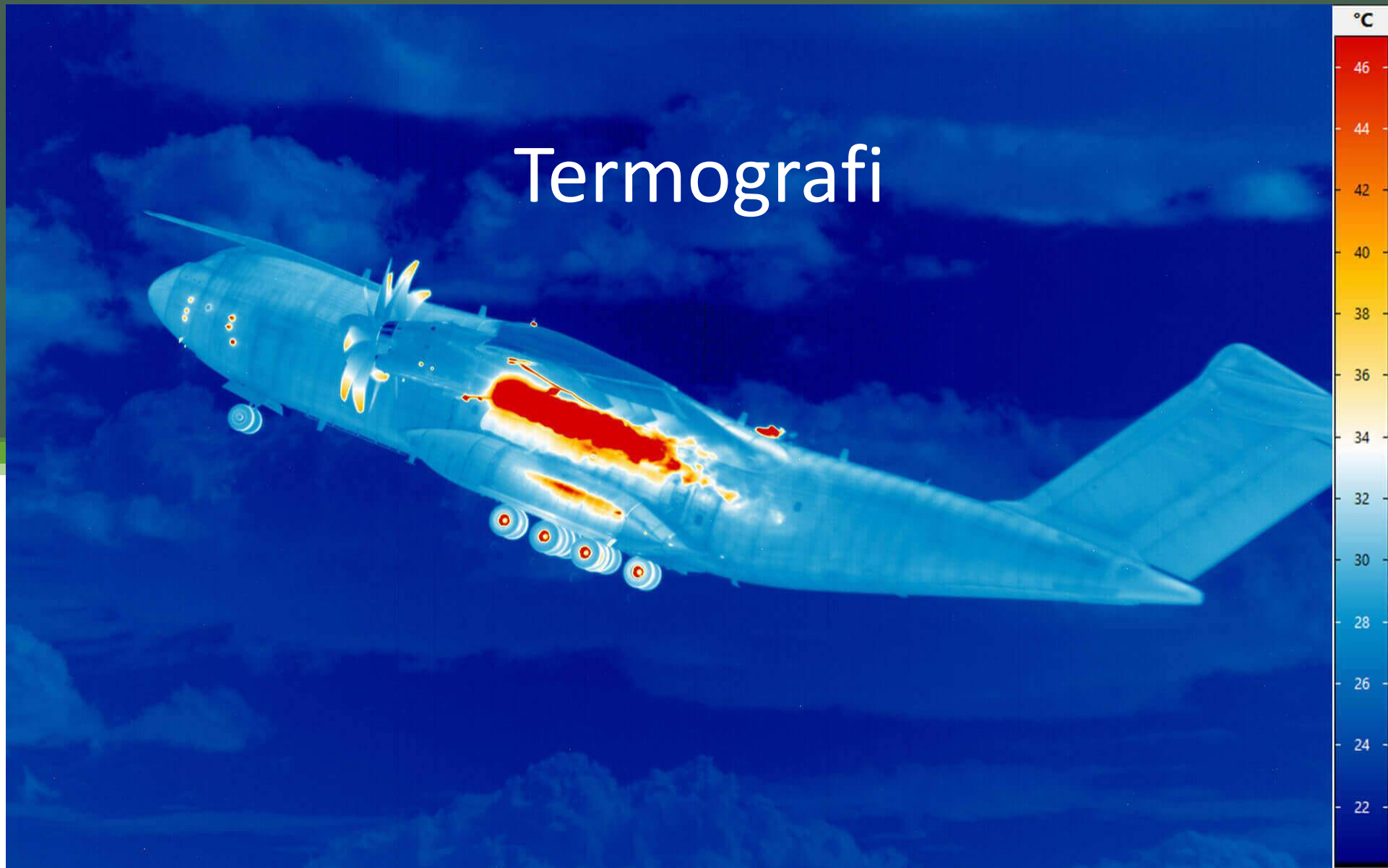
Termografi – Kızılötesi / Termal Görüntüleme

- Thermography
- Infrared / **T**hermal **I**maging
- Infrared Thermography Inspection
- Thermography Testing
- Infrared and Thermal Testing
- Infrared Testing of Materials



Thermogram

Termografi



Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

Kızılötesi test veya termografi, bir nesnenin yüzeyinden yayılan ve durumunu değerlendirmek için kullanılabilen kızılötesi ışığın dalga boyunun sensörler kullanılarak belirlenmesidir.

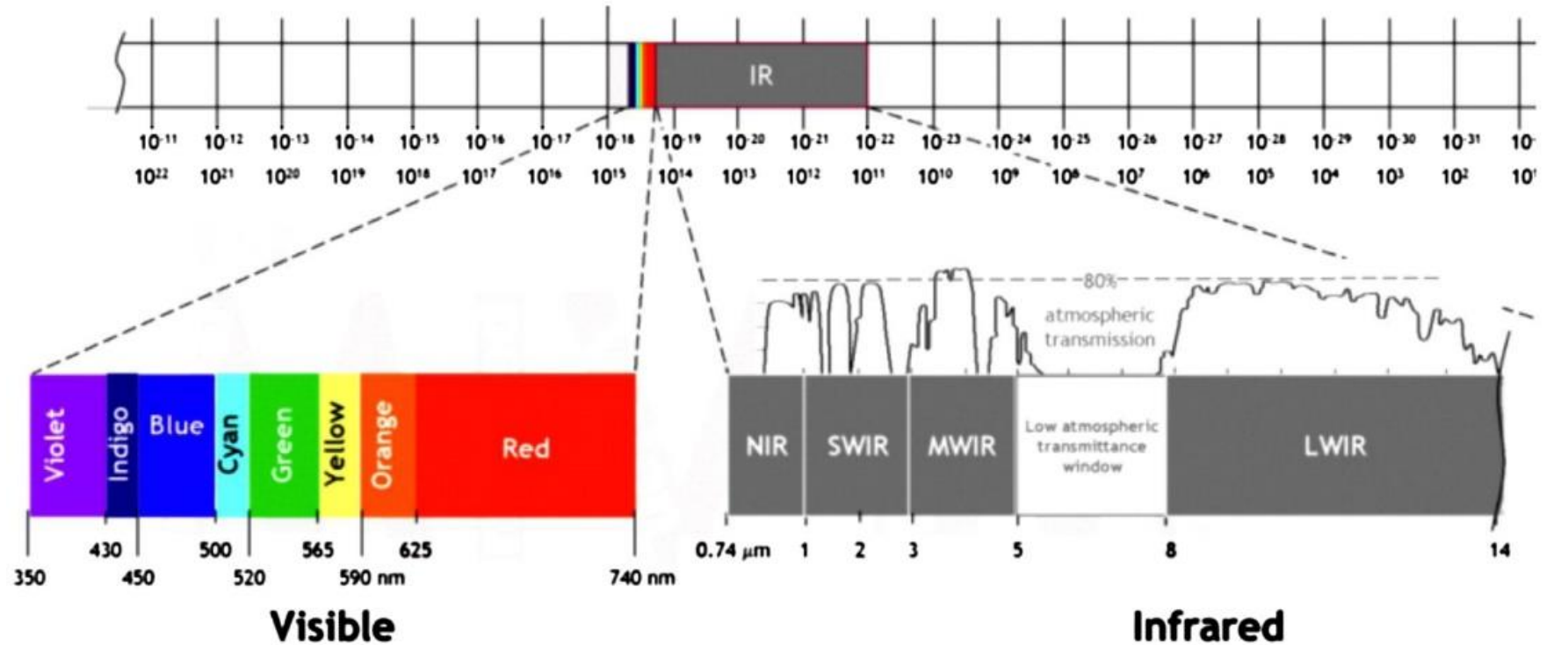
Termografi / Kızılötesi

- Nesnelere oldukça geniş bir tayfta kızılötesi ışınım yayarlar, fakat algılayıcılar sadece belli bant genişliklerini algılayabildikleri için genellikle kızılötesinden kastedilen belirli bantlardır.
- Bu yüzden kızılötesi bandı daha küçük alt bantlara bölünmüştür. Sıkça kullanılan bir bölümlenme biçimi şöyledir:
 - Yakın kızılötesi (**NIR**, IR-A DIN): 0,75-1,4 μm dalga boyları arasındadır. Düşük kayıp miktarı yüzünden genellikle fiberoptik iletişimde kullanılmaktadır. Gece görüşü ekipmanları da genellikle bu dalga boyunu kullanır.
 - Orta dalga kızılötesi (**MWIR**, IR-B DIN): 3-8 μm . Gündümlü füze teknolojisinde kullanılmaktadır.
 - Uzun dalga kızılötesi (**LWIR**, IR-C DIN): 8–15 μm . Dışarıdan bir ışınım kaynağına gerek duymadan sadece cisimlerin yaydığı ısıyla çalışan **termal görüntüleme cihazları** bu bandı kullanır.
 - Uzak kızılötesi (**FIR**): 15-1.000 μm

Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

Kızılötesi ışın spektrumu

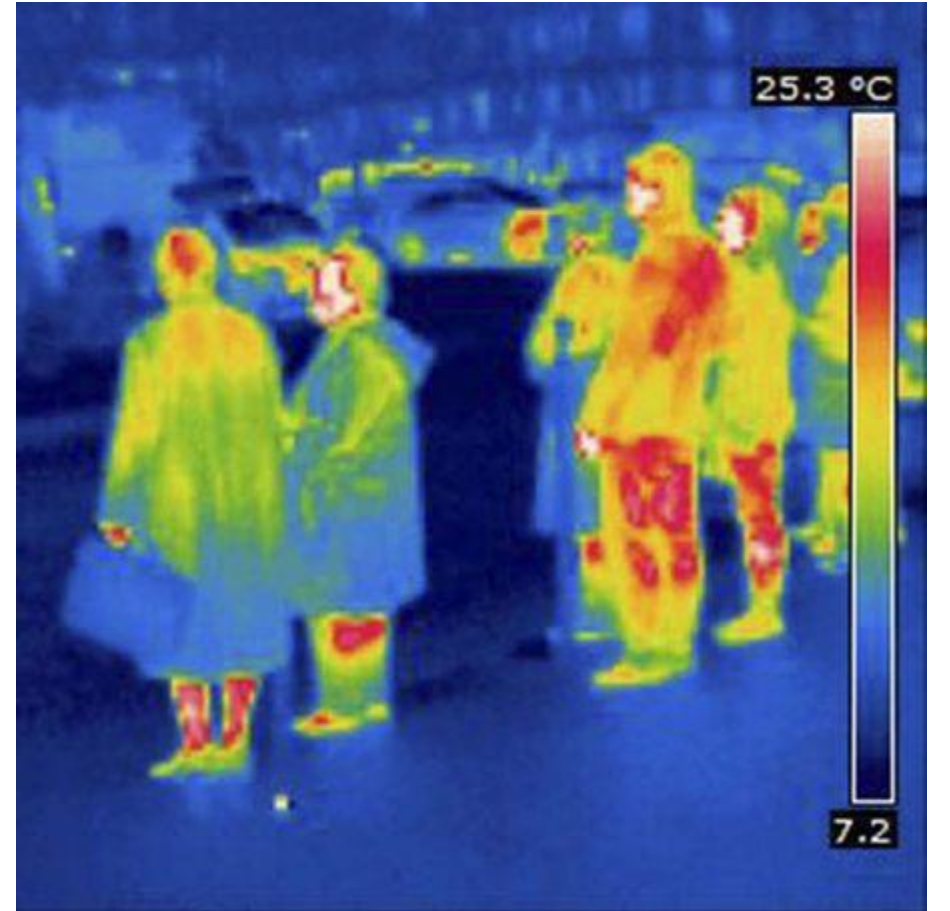
(kırmızı ötesi,
infrared, IR)



Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

Örnek Görsel:

Termal görüntüleme



Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

Örnek Görsel: Uzun dalga boylu infrared (IR) ışına karşı transparan (şeffaf) hale gelen siyah plastik torba.



Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

AVANTAJLARI / ÜSTÜNLÜKLERİ:

- Veri toplama sistemi sıcaklık değişimlerini zamanla kaydedebilir
- Yüksek hızlı, taşınabilir ve (uzaktan ölçüm) **temassız**
- Geniş alanları inceleme yeteneği
- İşletmeyi durdurmadan, çalışma sırasında muayene imkânı
- Ölçüm duyarlılığı $\pm 0,3$ °C seviyesindedir
- Hata, hasar ve kusurların ileri safhalara ulaşmadan tespiti mümkün

Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

DEZAVANTAJLARI / SINIRLARI:

- Uzaktan ölçüm sınırları, ortam şartlarına bağlı olarak değişebilir. Uzaktan muayenelerde (ölçümlerde) radyasyonun kat edeceği ortamdaki havanın bu radyasyonu soğurması (absorbsiyon) nedeniyle farklı değerler algılanabilir. Özellikle ortamdaki CO₂ ve su buharı belirli dalga boylarını fazla soğurur. Sonuç olarak ölçümlerde ortamın, radyasyonu (ışınımı) soğurmasını dikkate almak ve hatta bir ortam faktörü belirlemek gerekir.

Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

DEZAVANTAJLARI / SINIRLARI:

- Işınım yapan kaynağın, incelenen parçanın, **yüzey emisyon katsayısı** her zaman çok iyi bilinmeyebilir. **Emisyon katsayısı kaynağın yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır** ve bir düzeltme faktörü kullanmak gereklidir.
- Termografi bir nesnenin yüzeyindeki veya söz konusu yüzeye malzemenin içerisinden yansıyan durumun tespiti. **Yüzey sıcaklığının tespiti**dir. Nesnenin içindeki durumun tespiti ancak belirli değerlendirme ve çıkarımlar ile yapılabilir. **Yüzeysel bir yöntemdir.**

Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

Örnek Donanım:

El tipi kamera (*pistol-grip camera*)

Termal Çözünürlük 640 x 480 piksel



Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

Örnek Donanım:

Vizörlü termal camera
(*HD Thermal Camera with Viewfinder*)

Termal Çözünürlük 3,1 M



Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

Örnek Donanım:

Akıllı telefon bağlantılı termal kamera
(*Thermal Camera for Smartphones*)

- 19.200 piksel çözünürlük (160x120)
- 400°C'ye kadar sıcaklık ölçümü (üst sınır)
- 70 mK'e kadar sıcaklık farklarını algılayabilme (hassasiyet)

Kaynak: <https://www.flir.eu/products/flir-one-pro/?model=435-0007-02>



Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

- Termografi, küçük sıcaklık farklılıklarını algılayabilen ve ölçebilen çok sayıda kızılötesi sensör içeren bir kamera kullanır. Bu farkları gösteren görüntü, normalde renkli veya gri tonlamalı harita olarak bir bilgisayara indirilebilir ve ekranda görüntülenebilir.
- İki temel termografi türü vardır; *pasif termografi* ve *aktif termografi*.

TERMOGRAFI UYGULAMASI

Örnek Video:

Kızılötesi (*infrared*) kamera ile görüntüleme uygulamaları

https://www.youtube.com/watch?v=9TCK1Sa0_Vc

00:00 – 03:49

(What is Thermography?)

TERMOGRAFI UYGULAMASI

Video:

İnfrared Kamera
uygulama örnekleri



Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

Uygulama Alanları:

- **Havacılık endüstrisi;** sandviç paneller, karbon - epoksi kompozitlerde **delaminasyon** ve darbe hasarı muayenesi
- **Otomotiv endüstrisi;** kompozit yapılar, punta kaynakları ve yapıştırıcı bağların muayenesi
- **Enerji endüstrisi;** rüzgâr türbini kanatları, kaplama homojenliği ve kompozitlerde delaminasyon muayenesi

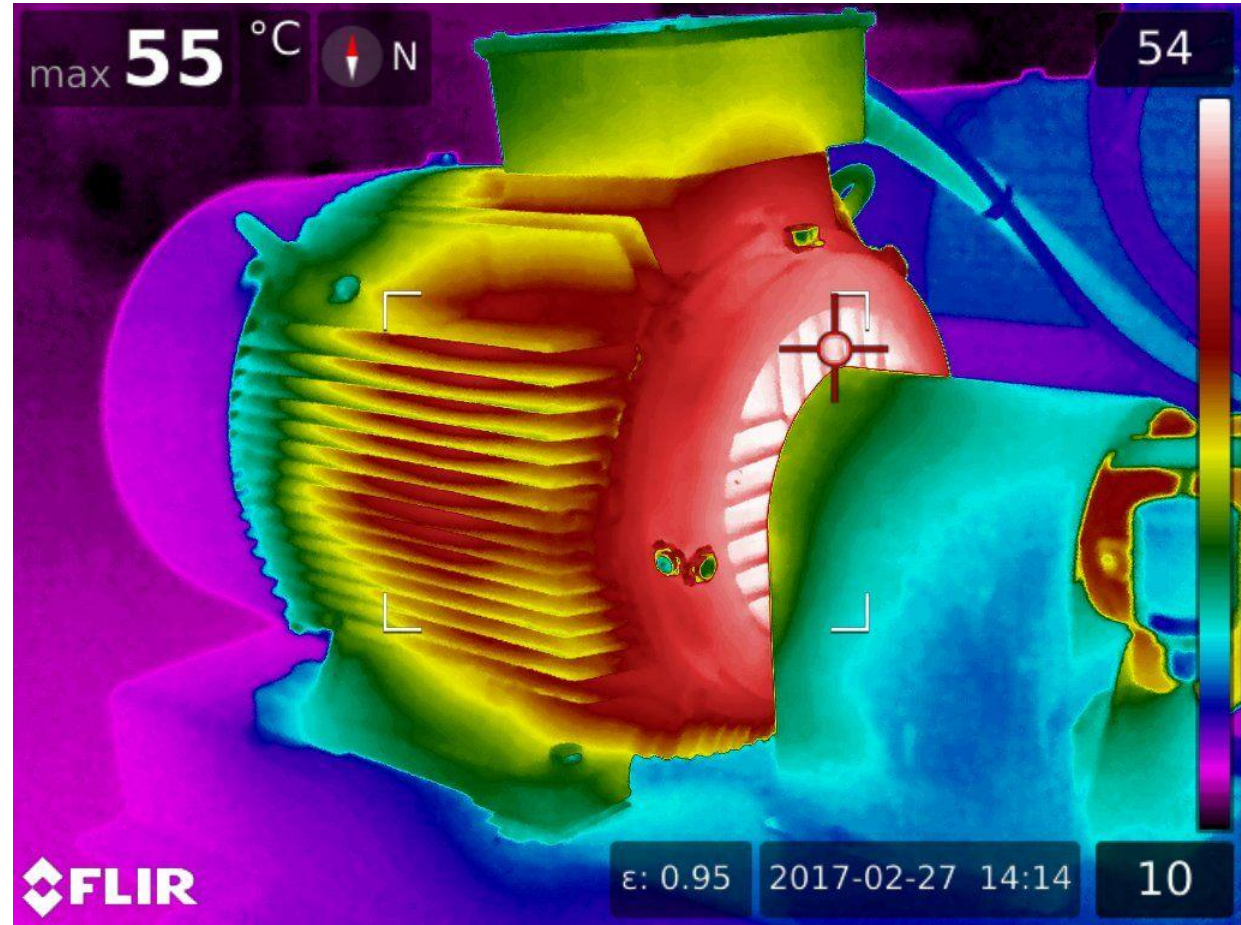
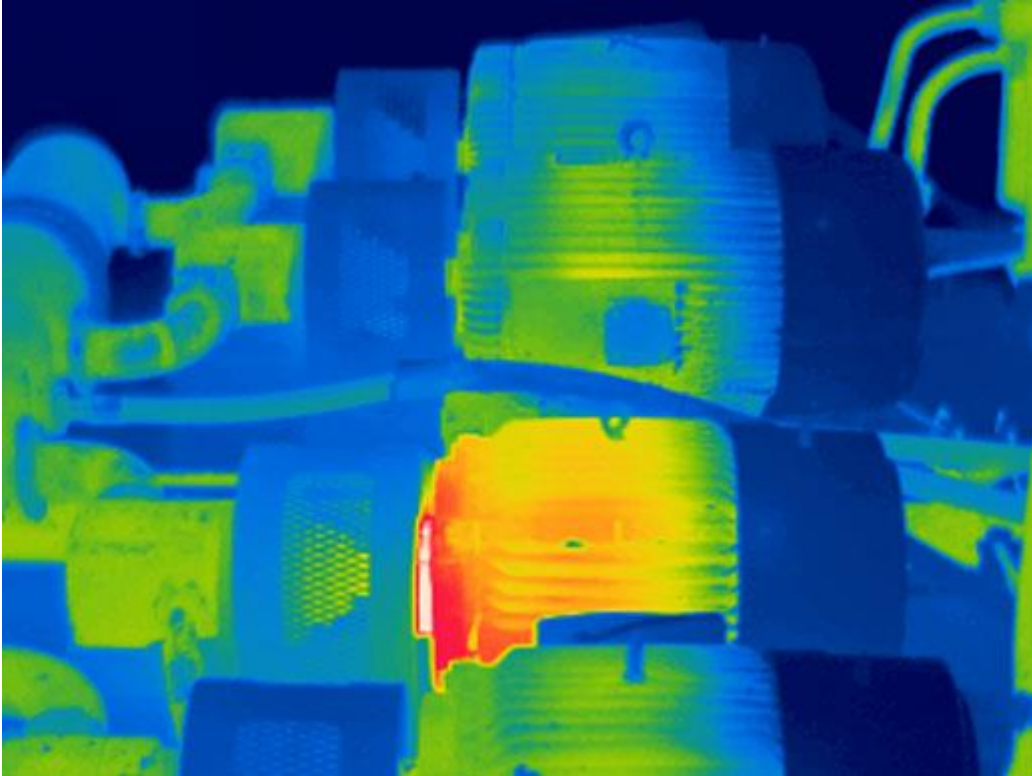
Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

Diğer uygulama alanları:

- **Elektrik Motorlarının İncelenmesi:** Termal Kamera ile motor işletme sıcaklık değişiminin 2- Boyutlu grafik halinde incelenmesi. Motor gövdesi ve motor komponentlerinin (motor sargıları, şaft, redüktör, kaplin) termal kamera ölçümleri ile normal işletme sıcaklıklarında olup olmadığının çalışma esnasında kesintisiz kontrol edilmesi, aşırı ısınan yatakların tespiti.
- **Gevşemiş veya Yıpranmış Hatların ve Bağlantıların Tespiti:** Kaçak tespiti
- **Pompalar, Fanlar ve Kompresörler:** Döner makinalarda, aşırı sürtünmeden ötürü oluşan sıcaklık artışları gözlemlenerek arızaya geçmeden önce termal kamera ile tespit edilebilmektedir.

Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

Termogram örnekleri (elektrik motoru ve yatakları)



Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

Diğer uygulama alanları:

- **Elektriksel Kaynaklı Yangını Önlemek İçin Test Ve Ölçme:** Alçak Gerilim sistemleri elektrik panoları, şalterler, anahtarlar, kontaktörler, röleler, klemensler ve transformatörler. Bütün bu cihazlar elektriksel bağlantılara, izolasyona ve aşırı akım koruma mekanizmalarına sahiptir. Bu mekanizmalardan herhangi birinin hata vermesi elektriksel yangınların kök sebebidir. Termal kamera ile bu araç-gereç hataya geçmeden önce tespit edilmektedir.

- *Örnek Görsel:*

Sigorta panosundaki aşırı ısınan bileşenlerin termogram ile gösterilmesi >>>

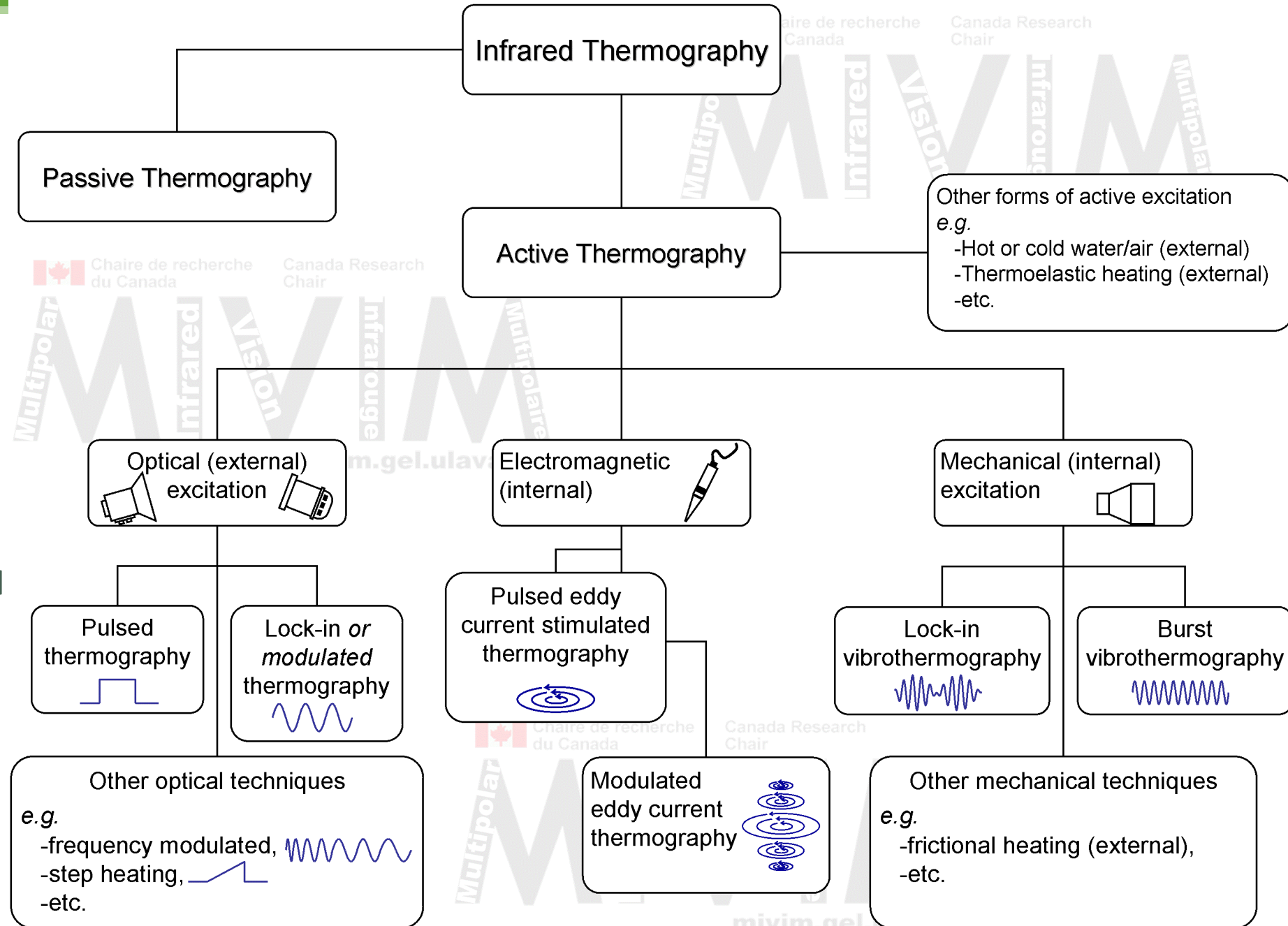


Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

- **Pasif termografide**, kamera basitçe test parçasına doğrultulur ve termal görüntüden bir sıcaklık haritası oluşturulur.
- **Aktif termografi**, harici bir ısı kaynağı kullanarak nesnenin yüzeyinin hızlı bir şekilde ısıtılmasını ve sıcaklığın zamanla nasıl azaldığını gözlemlemeyi içerir. **Malzemedeki kusurlar, sıcaklık azalma oranındaki değişimlerle ortaya çıkar.**

Termografi Infrared/Kızılötesi Görüntüleme

- Termografi tekniklerinin sınıflandırılması



Pasif Termografi

- *Örnek Görşel*: Bina dış yüzeylerinde ısı geçişinin (kaybının) izlenmesi



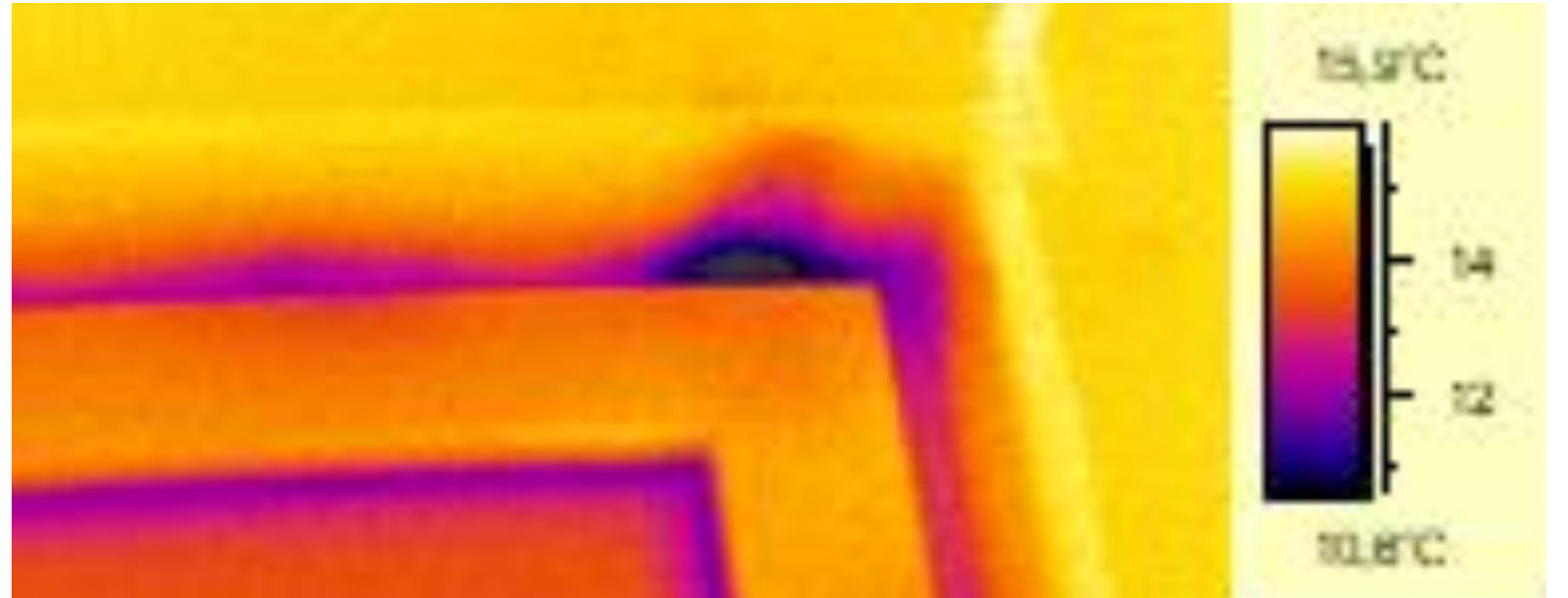
Pasif Termografi

- *Örnek Görsel:*
Döşemede sıvı sızıntı tespiti



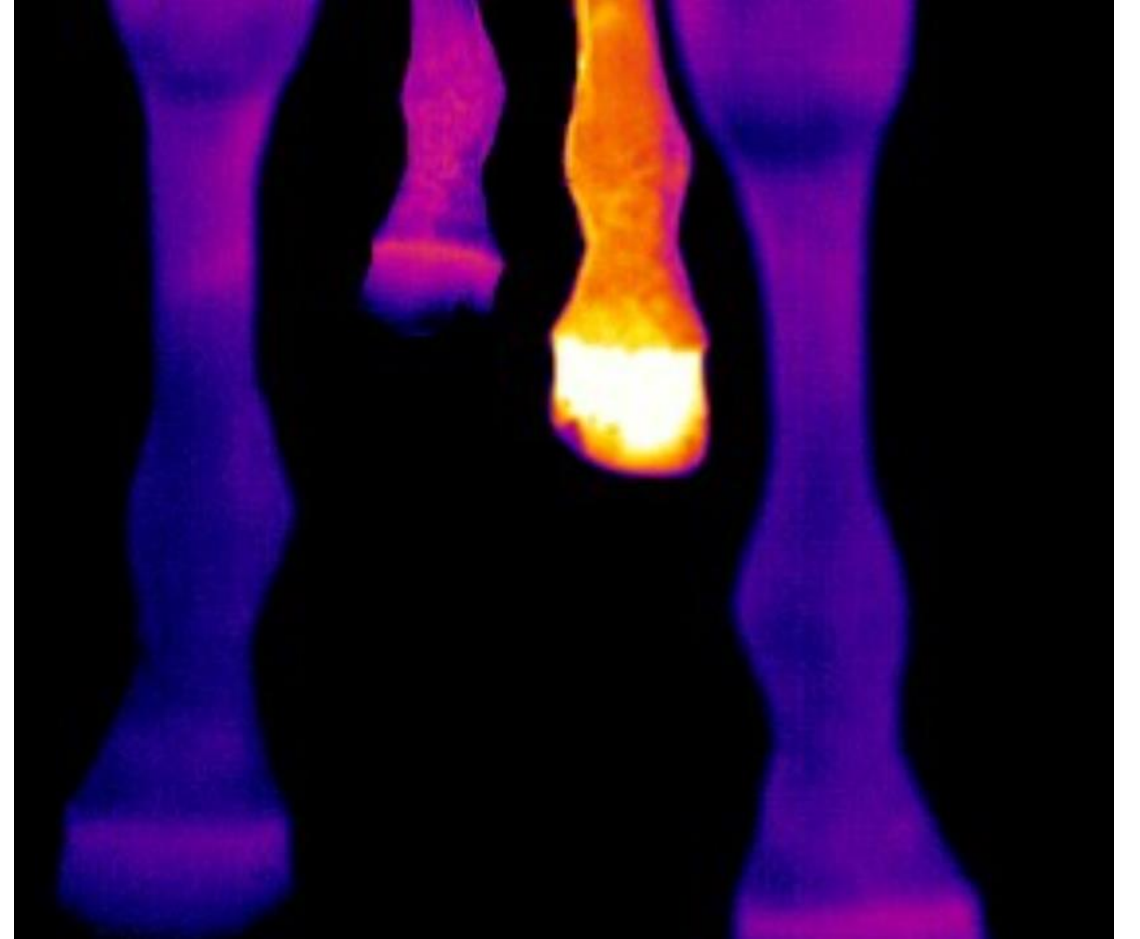
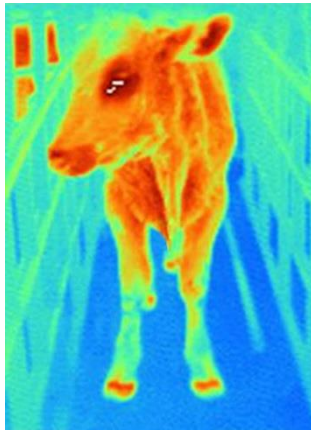
Pasif Termografi

- *Örnek GörSEL*: Kusurlu yerlerin tespit edilmesi



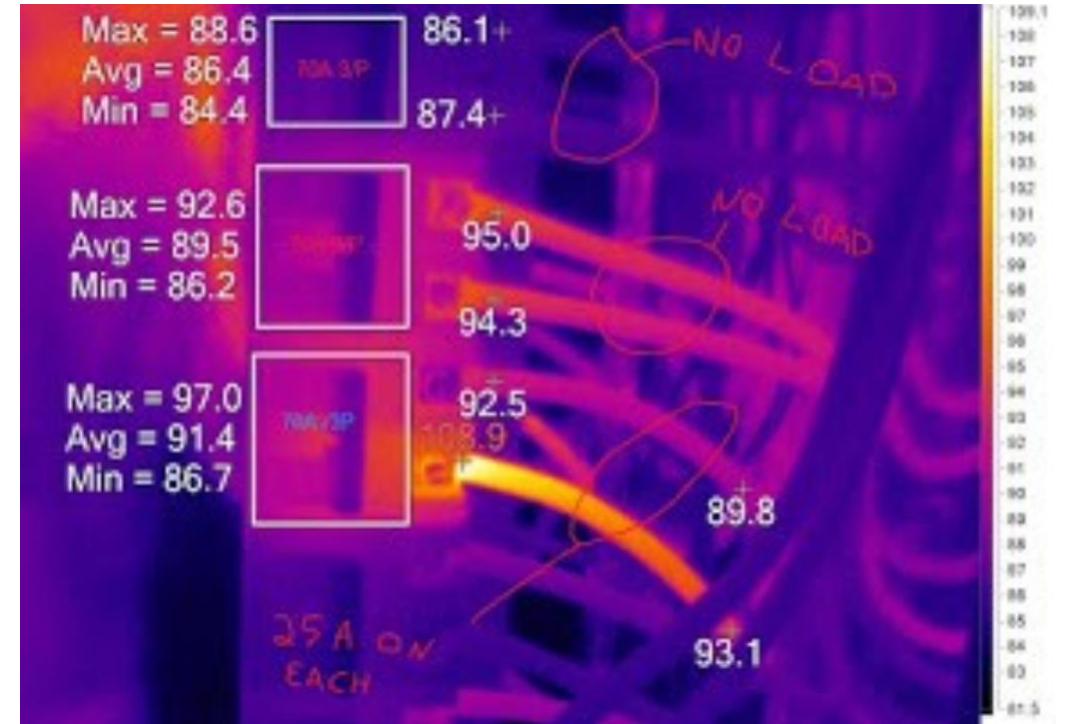
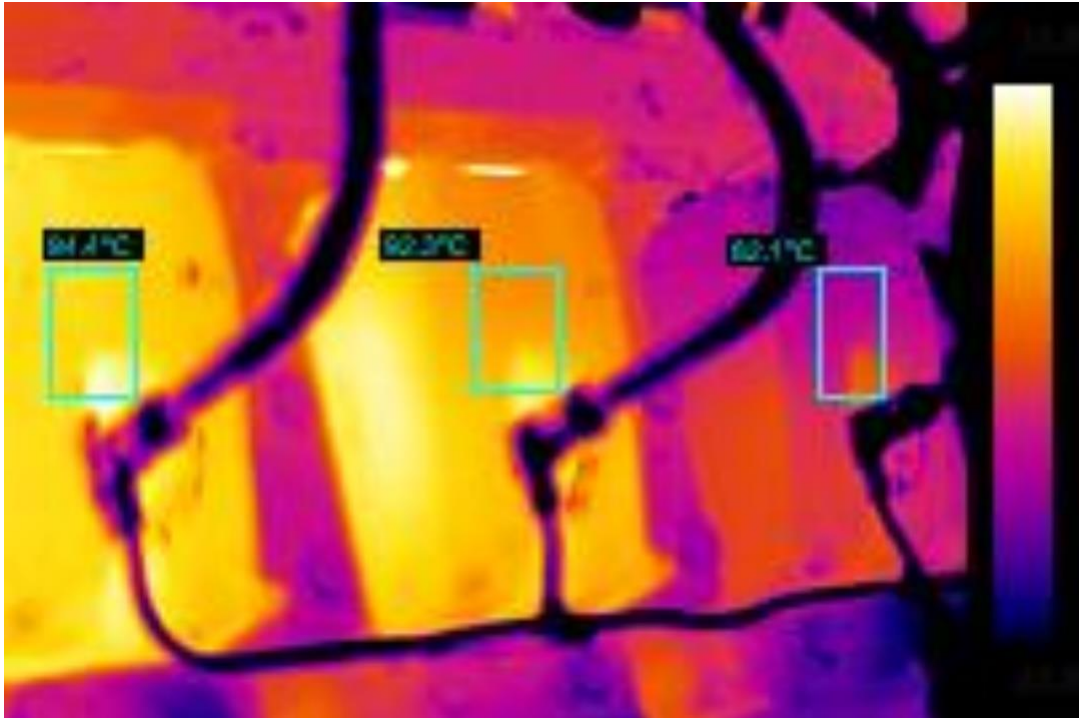
Pasif Termografi

- *Örnek Görşel:* Tıbbi uygulama, hastalıkların ve sorunlu dokuların tespiti



Pasif Termografi

- *Örnek Görşel*: Elektrik panolarında kaçak tespiti

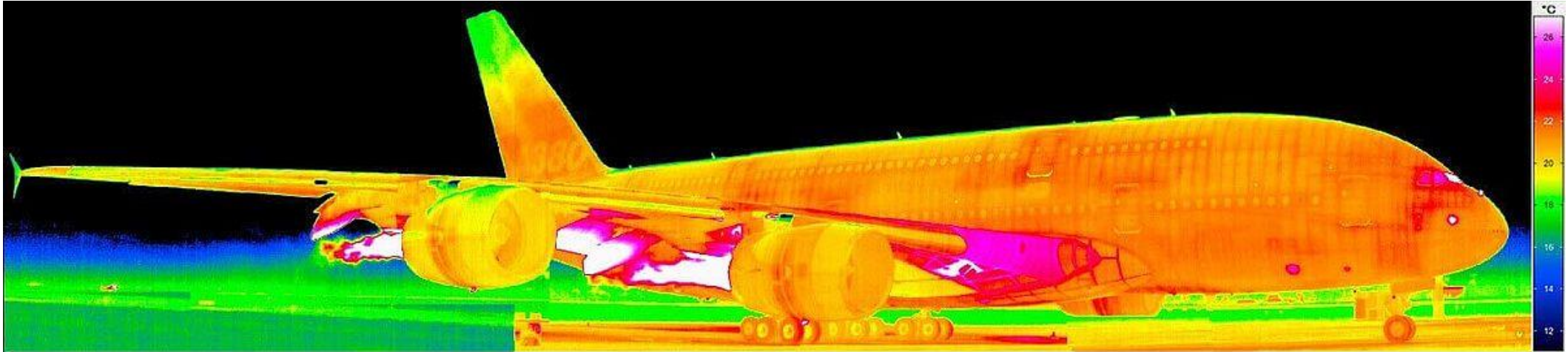


Termografi – Kızılötesi Görüntüleme

Pasif termografi, yayılan radyasyonun (kızılötesi ışın) dalga boyunun sensörler ile ölçülerek, yayılma gücü biliniyorsa veya tahmin edilebiliyorsa, sıcaklıkların hesaplanması ve dijital olarak okunması veya renkli ısı haritası (**termogram**) şeklinde görselleştirilmesidir. Bu yöntem, aşırı ısınan yatakları, motorları veya elektrikli bileşenleri tespit etmek için ve binalarda ısı kaybını izlemek için yaygın olarak kullanılır.

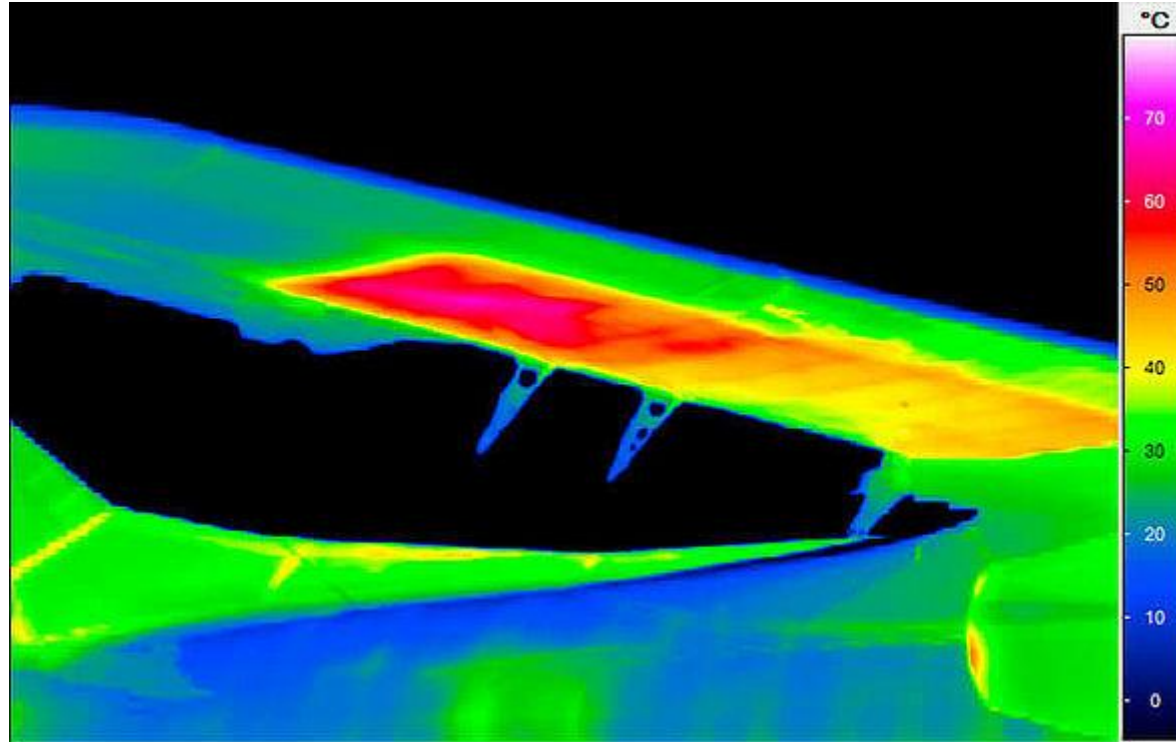
Pasif Termografi

- *Örnek GörSEL*: Uçak uzun menzil termografik incelemesi



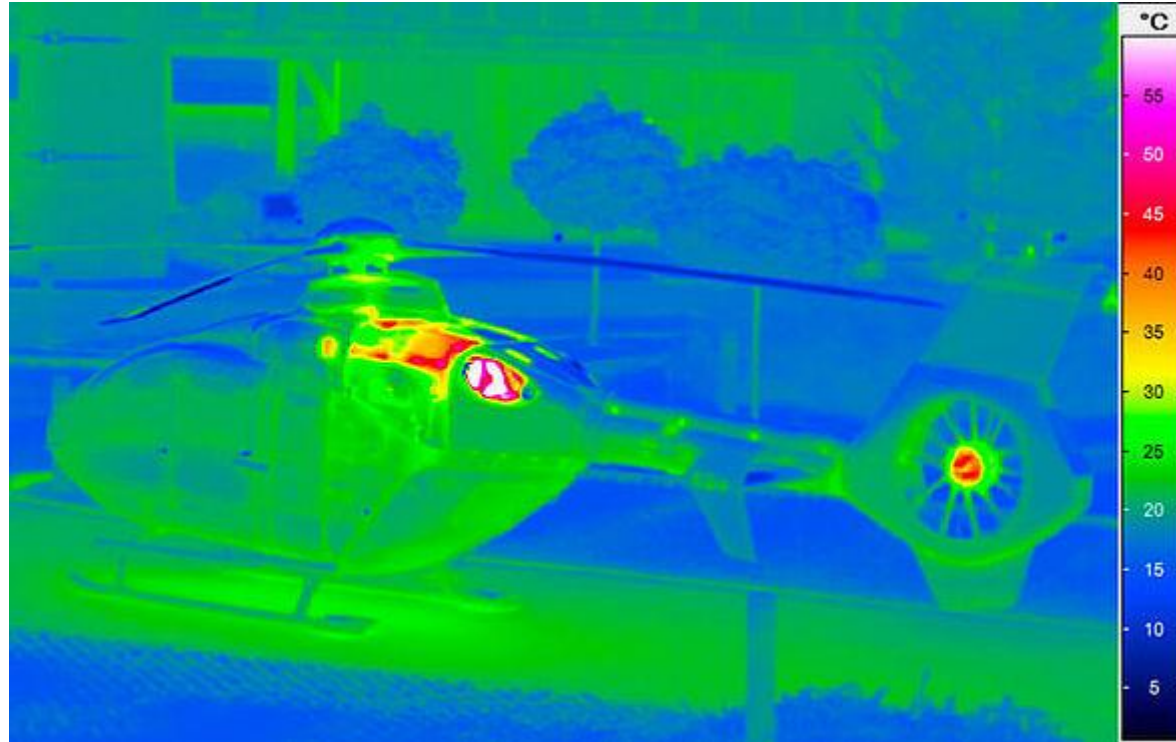
Pasif Termografi

- *Örnek Görşel*: Uçak kanadı termografik incelemesi



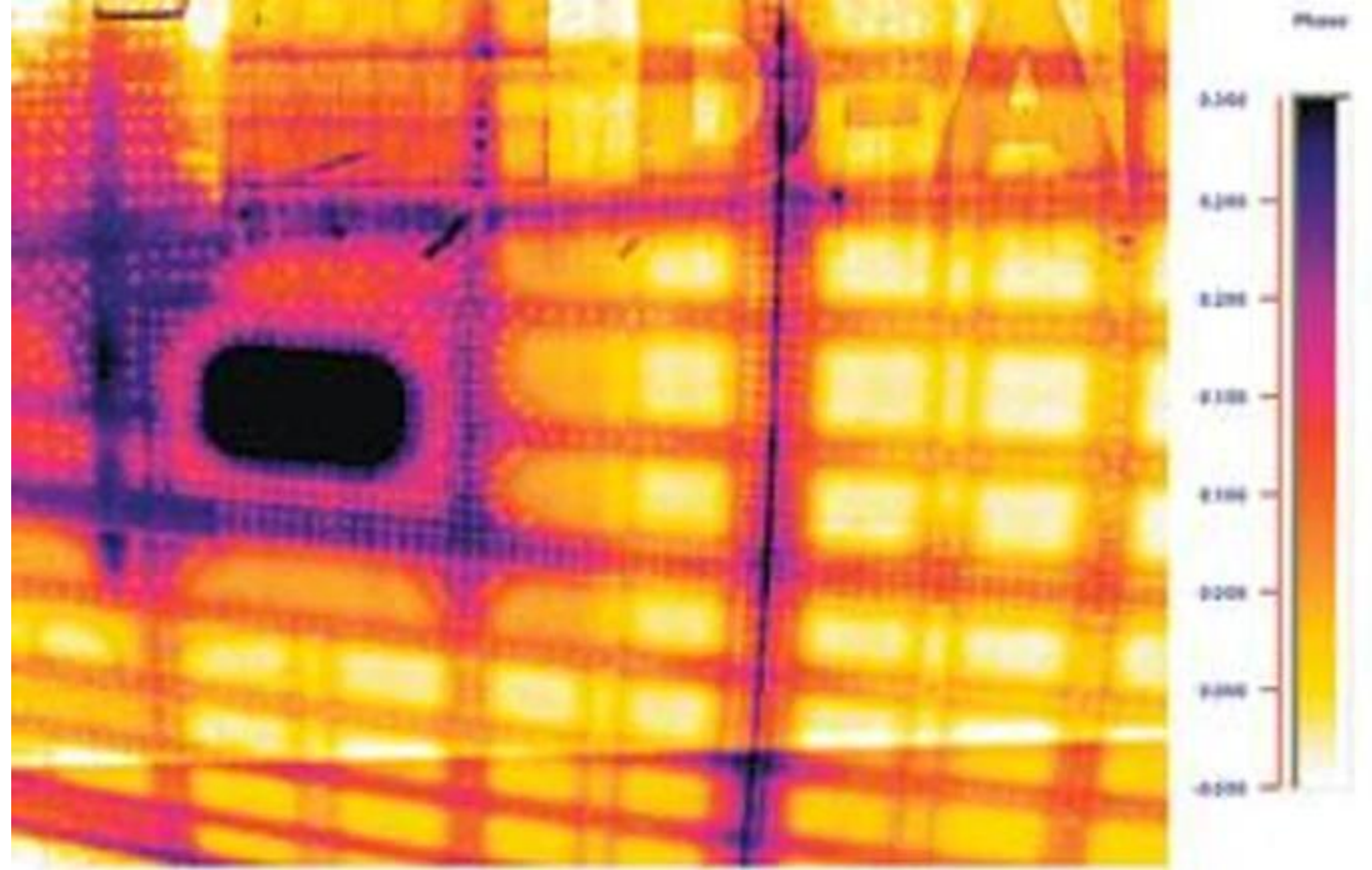
Pasif Termografi

- *Örnek Görşel*: Helikopter motor ve yataklarında ısı akışı



Pasif Termografi

- *Örnek Görsel:*
Uçak gövdesindeki yapısal elemanların termogram ile görüntülenmesi



TERMOGRAFI UYGULAMASI

Pasif + Aktif Termografi Uygulaması

Örnek Video: Sıcak Hava Tabancası ile ısıtılan yüzeylerin Kızılötesi (infrared) kamera yardımıyla incelenmesi

<https://www.youtube.com/watch?v=zqoQ33zm30I>

00:00 – 03:32

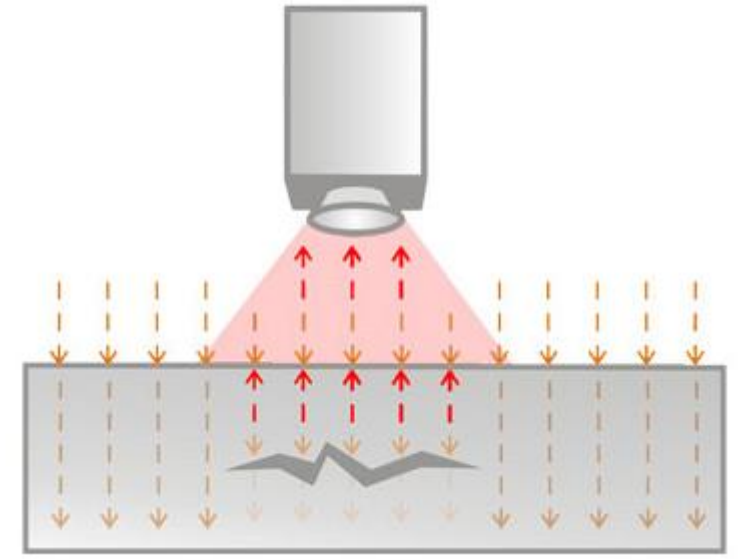
(Composite Thermal Imaging)

TERMOGRAFI UYGULAMASI

Kompozit malzeme infrared kamera ile muayenesi



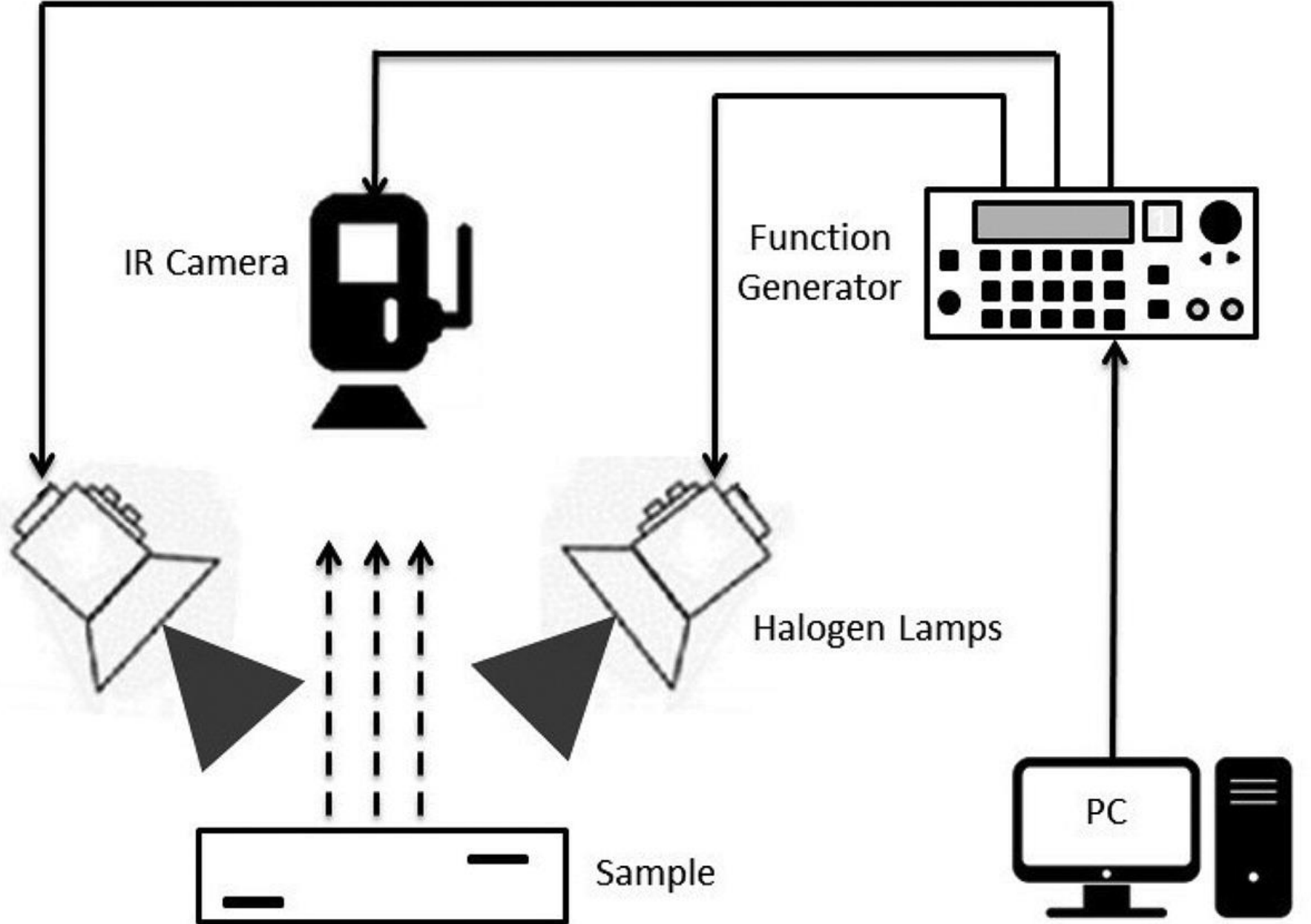
Aktif Termografi



Aktif termografi, bir yapı boyunca sıcaklık değişimi meydana getirilerek, yapı içinde ısı geçişini (akışını) etkileyen özelliklerin ortaya çıkarılmasıdır. Analiz edilebilir **yüzey sıcaklığı değişikliklerine neden olunarak** (incelenen yüzeye ısı verilerek), bir bileşenin durumunun belirlenmesidir. Genellikle kompozitlerde yüzeye yakın delaminasyonlarını (tabakaların ayrılması) veya yapışma kusurlarını tespit etmek için kullanılır.

Aktif Termografi

Görseldeki *Aktif Termografi* uygulamasında halojen lambalar ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır.



Aktif Termografi

Örnek Görsel: Aktif Termografi
Halojen lamba (ısı kaynağı) ve
IR kamera bir arada
görölmektedir.

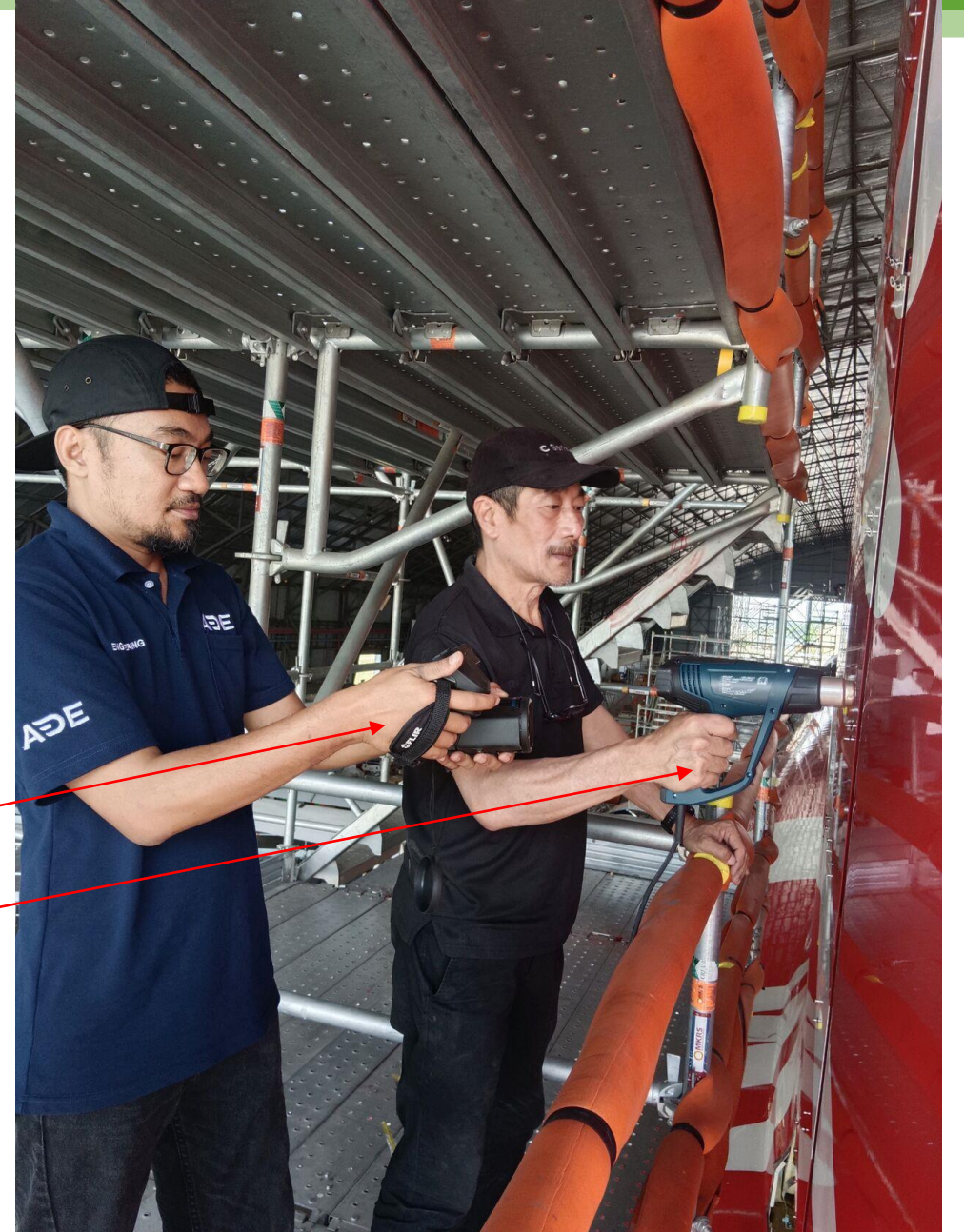


TERMOGRAFI UYGULAMASI

Örnek:

Airbus A320 tipi uçağın dümen dış yüzeyinde Pasif + Aktif Termografi Uygulaması

- İnfrared kamera
- Sıcak hava tabancası



TERMOGRAFI UYGULAMASI

Örnek:

Airbus A320 tipi
uçanın dümen dış
yüzeyinde Pasif +
Aktif Termografi
Uygulaması

- İnfrared kamera
- Sıcak hava tabancası



TERMOGRAFI UYGULAMASI

Örnek Video: Kompozit malzemenin aktif termografi yöntemi ile muayenesi

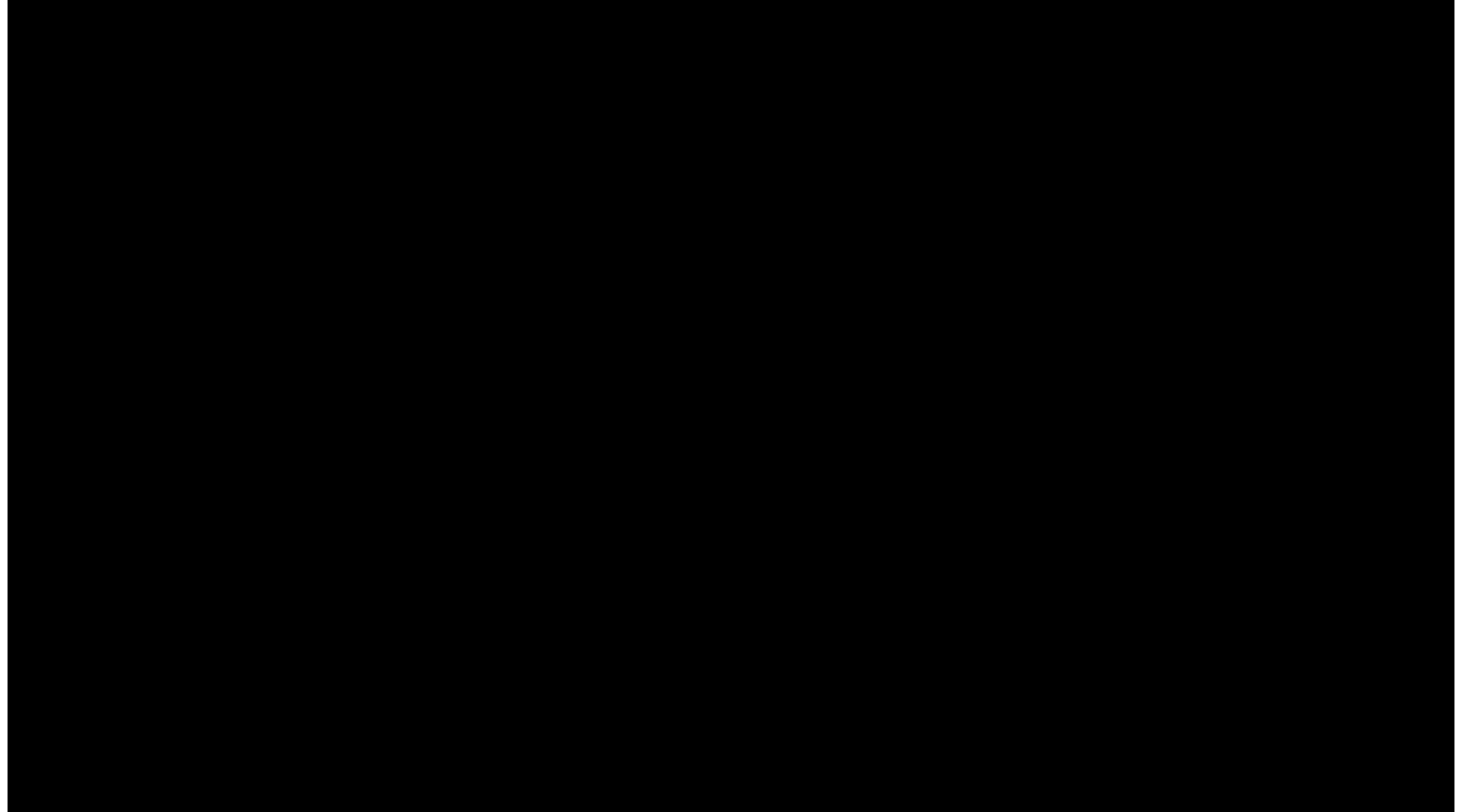
https://www.youtube.com/watch?v=UDv9FYfK_Ts

00:00 – 03:59

(Flash Thermography for Non-Destructive Testing)

TERMOGRAFI UYGULAMASI

Aktif
termografi ile
kompozit
malzeme
muayenesi



TERMOGRAFI UYGULAMASI

Örnek Video: Uçak kompozit yapılarına su girişlerinin tespiti ve takibi

<https://www.youtube.com/watch?v=Kv13iuOvDpM>

00:13 – 06:07

(Aviation- thermal imaging for water ingress)

TERMOGRAFI UYGULAMASI

Kompozit malzeme
bünyesine sızan suyun
tespit edilmesi



Kaynakça:

- Tahribatsız Malzeme Muayenesi Cilt-2, Doç. Dr. Özlem Karadeniz, Prof. Dr. Süleyman Karadeniz, [MMO Yayınları](#) 685-2, İzmir, 2018
- <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-non-destructive-testing>
- <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/thermography>
- https://www.ktuweb.com/page_showdoc?course=ME367&dopage=study
- <https://www.ktunotes.in/ktu-non-destructive-testing-me367-notes/>
- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Termografi>
- <https://tr.wikipedia.org/wiki/K%C4%B1z%C4%B1l%C3%B6tesi>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_and_thermal_testing
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermography>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Thermographic_inspection
- https://en.wikipedia.org/wiki/Thermographic_camera
- <https://de.zxc.wiki/wiki/Thermografie>
- <https://www.pruftechnikakademi.com/single-post/termografi-nedir>
- <http://www.3eelectrotech.com.tr/arsiv/yazi/129-kizilotesi-goruntuleme-ve-tibbi-termografi/>
- https://tr.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmann_yasas%C4%B1