ÉPÜLETENERGETIKAI FELMÉRÉSEK TERMOGRÁFIAI ESZKÖZÖKKEL

Az épületek energetikailag egyik legfontosabb eleme a külső „burkolatuk": a falak, a nyílászárók és a tető. Lényeges, hogy ezek az elemek minél jobb hőszigetelő képességgel (minél kisebb hővezető és hősugárzási képességgel) rendelkezzenek. A hőhidakat viszonylag egyszerű felismerni: ott, ahol egy kültéri felvételen a legmagasabb hőmérséklet tapasztalható, a legtöbb esetben hőhíd (vagy repedés) található. Beltéri felvételeken a leghidegebb helyek utalnak többnyire hőhidakra. Ugyanígy megállapítható, hogy melyik épületelem bír jobb vagy rosszabb hőszigetelési tulajdonságokkal. Vizsgálható még a fugák és csatlakozások kivitele, az épületelemek által okozott szerkezeti hőhidak, valamint az épületgépészeti vagy villamos szerelésből származó „sérülések" a külső falakban.

A termográfiai mérések alapfeltételei

Alapfeltétel minden méréshez, hogy a beltéri és kültéri hőmérséklet különbsége legalább 15 K legyen, ne legyen esőtől nedves a fal, ne fújjon a szél, és a mérés napsütésmentes napszakban történjen. A termográfiai (hőkamerás) hőmérsékletérzékelés mérési pontossága viszont ezen túl elsősorban a mért felület sugárzás-kibocsátási (emissziós) képességétől függ. Minél kisebb egy test emissziós képessége, annál fontosabb a korrekciós számítás, amelynek alapja e tényezőn túl csak a reflektáló hőmérsékletnek (környezeti hőmérséklet) és (hősugárzás szempontjából átlátszó testek esetén) a háttér hőmérsékletének pontos ismerete mellett számítható ki. Az anyagok emissziós tényezője az anyagtól, a felület érdességétől, a hullámhossztól és a látószögtől függ. Az említett összefüggésből következik, hogy egyes esetekben semmiképp nem mérhető a tárgy hőmérséklete:

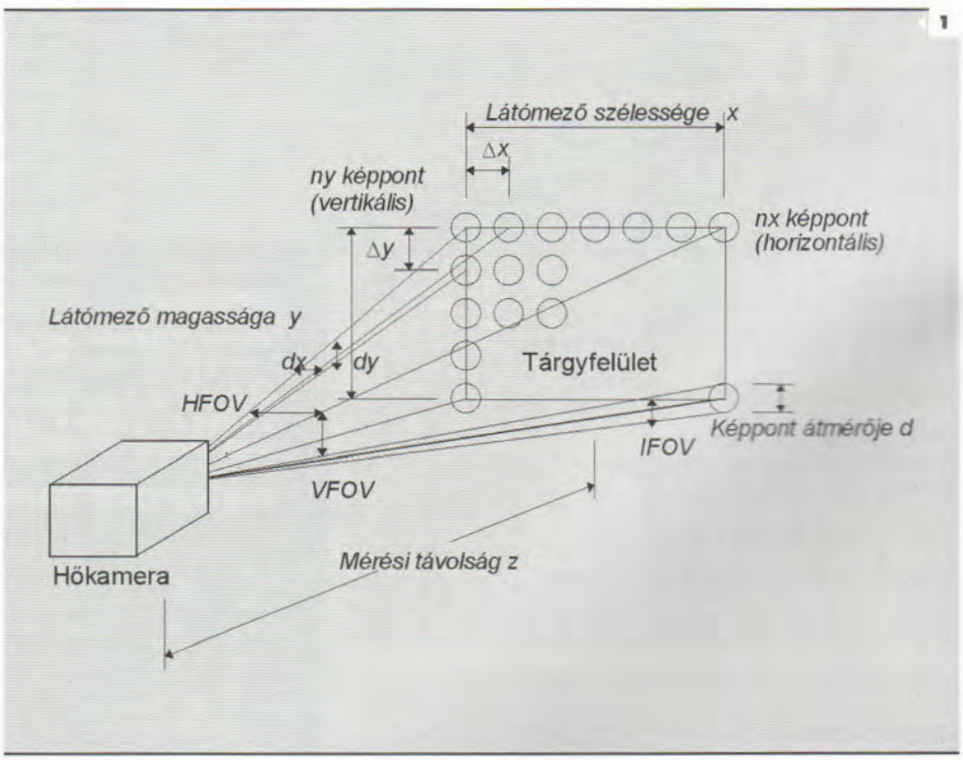
- tükröződő felületek esetén – pl. polírozott felületek, oxidáció-mentes fémfelületek,
- infrasugárzás szempontjából átlátszó anyagok esetén – pl. egyes kristályos anyagok, különböző gázok.

Hasonló ténnyel állunk szemben, amikor üvegfelületeket kellene bevizsgálnunk: jellegzetes, hogy az üveg a 3,5 μm-nél rövidebb hullámhosszú sugárzást átengedi (így a napsugárzásban lévő fényt és rövidhullámú hősugárzást is), de a 3,5 μm-nél hosszabb hullámú sugárzást (például az alacsonyabb hőmérsékletű testek hősugárzását) nem. A hosszúhullámú tartományban (hosszúhullámú atmoszférikus ablak: 8...14 μm) tehát az üveg nem rendelkezik transzmissziós (átengedő) képességgel, ennek ellenére mégis csupán 60%-os emissziós tényezővel bír a tükröző képessége miatt. Sőt, mint „polírozott" felület, tovább nő a tükröződés mértéke, ha nem derékszögből történik a felvételkészítés. Természetesen az üvegen lévő szennyeződés (por) kis mértékben növeli az emissziós képességet, de ez egy bizonytalan és gyakorlatilag elhanyagolható tényező.

Összefoglalva tehát az eddig említetteket, a hosszúhullámú hőkamerák (ilyenek a jelenleg döntő többségben forgalmazott úgynevezett valós idejű mátrixos – bolométeres – érzékelővel rendelkező hőkamerák, amelyek a legelterjedtebbek az épületek termográfiai felmérésénél) tükörként érzékelik az üveget, ezért az üvegfelületek hőmérsékletének mérése ilyen eszközökkel nem oldható meg. (Megjegyzés: a rövidhullámú kamerákkal – kiegészítő szűrőtől függően – vagy átlátunk az üvegen, vagy az üveg felületi hőmérsékletét mérjük, amennyiben 100 °C-nál magasabb hőmérsékletről van szó. Nagyon magas hőmérséklet esetén igen speciális szűrővel, hosszúhullámú hőkamerákkal is van lehetőség az üvegfelület

A képmező geometriai paraméterei

1



hőmérsékletének mérésére, de ezt nagyon ritkán szokták alkalmazni.)

A termográfiai vizsgálat során egyébként felfedezhető még a nedvesség által okozott párolgási hőelvonás miatt fellépő hőmérsékletcsökkenés is. Ez természetesen különösen jó termikus felbontású hőkamerát feltételez. Ezzel a módszerrel megtalálhatók például a tetőbekötések, eresz- vagy szennyvízvezetékek tömítetlensége miatt bekövetkező beázások, illetve a földből feláramló vagy beszivárgó nedvesség, valamint az építési anyagokban összegyűlt – páralecsapodásból eredő – nedvesség.

Kiértékelhető hőkép-minőség

Az épülettermográfiai felvételeknek bizonyos mérési feltételeknek és hőkamera-minőségi paramétereknek eleget kell tenniük ahhoz, hogy a mérési eredményeket ki lehessen értékelni. Nagyon gyakran (az említett audit-jegyzőkönyvben is) a hőkép hőmérséklet-, geometriai- és képpont-felbontásával gond adódhat. (Megjegyzés: ennek oka többnyire a nem megfelelő – túl alacsony teljesítményű – hőkamerák kiválasztása, valamint a kivitelező hiányos szakmai képzettsége.)

Hőmérséklet-felbontás

Különösen akkor, amikor a mérendő tartomány a szobahőmérséklet és méréstartomány alsó határa közé esik, a hőmérsékletfelbontás határozza meg döntően a képminőséget. A „NETD" (noise equivalent temperature difference) a hőkamera saját zajának effektív értékét képviseli, kifejezve az ugyanilyen értékű érzékelőkimeneti feszültségjel-változást eredményező tárgyi hőmérsékletkülönbségben (rendszerint 30 °C körül mérve). Más szóval: a „NETD" a tárgyi hőmérsékletváltozás értéke, amely a hőkamera saját zajának megfelelő villamos jelváltozást eredményez a hőkamerában. Ez az érték a tárgy hőmérsékletének csökkentése esetén nagyon megnő, különösen a rövidhullámú készülékek esetén.

Az épület-termográfiai mérések esetén 0,5 °C-nál kisebb hőkülönbségeket kell tudnunk a hőképen felismerni, és az ehhez szükséges „zajszint" kisebb kell, hogy legyen ennek felénél, vagyis 0,25 °C-nál, illetve pontosabban +/-0,12 °C-nál. Mivel a hőkamera-gyártók a fent említett NETD-értéket 30 °C-nál definiálják, és ez az érték csökkenő hőmérséklet mellett erősen romlik, az épület-termográfiai mérések esetén tipikus kültéri hőmérsékletek (-15 °C…5 °C) miatt legalább +/-0,08 °C NETD-értékű (vagy más szóval: termikus felbontással rendelkező) hőkamerát kell választani. Ennél gyengébb minőségű kőkamerákkal a fent említett épület-hibajelenségek nem ismerhetők fel!

KÜLÖNBSÉGEK A BEL- ÉS KÜLTÉRI TERMOGRÁFIAI VIZSGÁLATOK KÖZÖTT

KÜLTÉRI TERMOGRÁFIA	BELTÉRI TERMOGRÁFIA
+ ÁLTALÁBAN A TELJES FALFELÜLET JÓL BELÁTHATÓ (JÓ ÁTTEKINTHETŐSÉG).	– GYAKRAN CSAK A FALAK EGYES RÉSZEI MÉRHETŐK, AKÁR LÉNYEGES FELÜLETEK IS ELÉRHETETLENEK.
+ VÁLTOZTATHATÓK A FELVÉTELI POZÍCIÓK.	– A RÁLÁTÁS GYAKRAN A MEGLÉVŐ BÚTORZAT VAGY AZ ÉPÜLETGÉPÉSZETI ELEMEK MIATT IGEN KORLÁTOZOTT.
+ KIS IDŐIGÉNY, NEM ZAVARJA AZ ÉPÜLET HASZNÁLÓJÁT.	– NAGY ELŐKÉSZÍTÉSI IDŐIGÉNY, ZAVARJA AZ ÉPÜLET HASZNÁLÓJÁT.
– ERŐSEN IDŐJÁRÁSFÜGGŐ, CSAK NAPSÜTÉSMENTES NAPSZAKBAN VÉGEZHETŐ EL.	+ AZ IDŐJÁRÁSNAK NINCS KÖZVETLEN HATÁSA (ERŐSEN GYENGÍTETT HATÁS AZÉRT VAN). BIZONYOS FELTÉTELEK MELLETT NAPPAL IS ELVÉGEZHETŐ.
– PROBLÉMÁS TETŐTÉRI ÉS SZELLŐZTETETT ÉPÜLETBURKOLATOK ESETÉN.	+ TETŐTÉRI ÉS SZELLŐZTETETT ÉPÜLET-BURKOLATOK ESETÉN JOBBAN ÉRTÉKELHETŐ.
– GONDOT OKOZ A KÜLSŐ FELÜLETEK LEFEDÉSE FÁKKAL, ERKÉLYEKKEL, ÉPÜLETDÍSZEKKEL.	+ A LÉGSZIGETELÉS HIÁNYOSSÁGAI (HUZAT) SZÉLBEN JOBBAN ÉRZÉKELHETŐK.

Geometriai felbontás

A hőmérsékleti felbontáson túl a geometriai felbontás is jelentősen befolyásolja az elérhető képminőséget, illetve a kép hőmérsékletadatainak helyességét. Az ezt befolyásoló IFOV-paraméter (legkisebb elemi látószög, tipikusan mradban megadva) azt a látószöget adja meg, amely egy egyedülálló érzékelővel (képponttal) került leképezésre. A részletek jó reprodukálása érdekében fontos, hogy ez az érték minél kisebb legyen. Például 1,5 mrad IFOV azt jelzi, hogy minden egyes pixelhez rendelt egyedi mérési pont (kivetített mérőfolt) 1 m-es távolságon 1,5 mm átmérővel rendelkezik (1. ábra).

Mivel az így meghatározott, „kivetített" képpont helyzetét a mérendő tárgyon nem ismerjük, és maga az érzékelő-mátrix is (gyártástechnológiailag szükséges) hézagokkal rendelkezik, a fenti képpontméret hárommal szorzandó a legkisebb mérhető tárgy méretének meghatározása céljából. Ha ezt nem tartjuk be, akkor a mérőfolt nemcsak a tárgy felületének, hanem hátterének a sugárzását is tartalmazhatja. Mivel a mérőfolton belül átlagolás történik, a háttér hőmérsékletének hatására a mérési eredmény akár alacsonyabb, akár magasabb lehet a tárgy valódi hőmérsékleténél. Minél nagyobb a tárgy és a háttér hőmérsékletének különbsége, annál nagyobb lesz a mérés hibája is! Természetesen a fenti szabály nemcsak kis méretű tárgyak (például vékony vezetékek, izzószálak stb.) esetén érvényesül, hanem nagy kiterjedésű tárgyak (például nagy keresztmetszetű kábelek, nyílászárók stb.) mérésekor is. Nyilván más dimenziókról van szó: a kis tárgyak esetén mm nagyságrendű mérőfelületekről van szó, amelyek az alkalmazott hőkamera és optika geometriai felbontóképessége alapján legfeljebb több tíz cm-es távolságokból mérhetők; nagy tárgyak esetén cm méretű mérőfelületek több m-es (akár 10 m-es) távolságból történő érzékeléséről van szó. Minden esetben a szabály betartását lehetővé tévő eszköz alkalmazása szükséges!

Egy konkrét példa

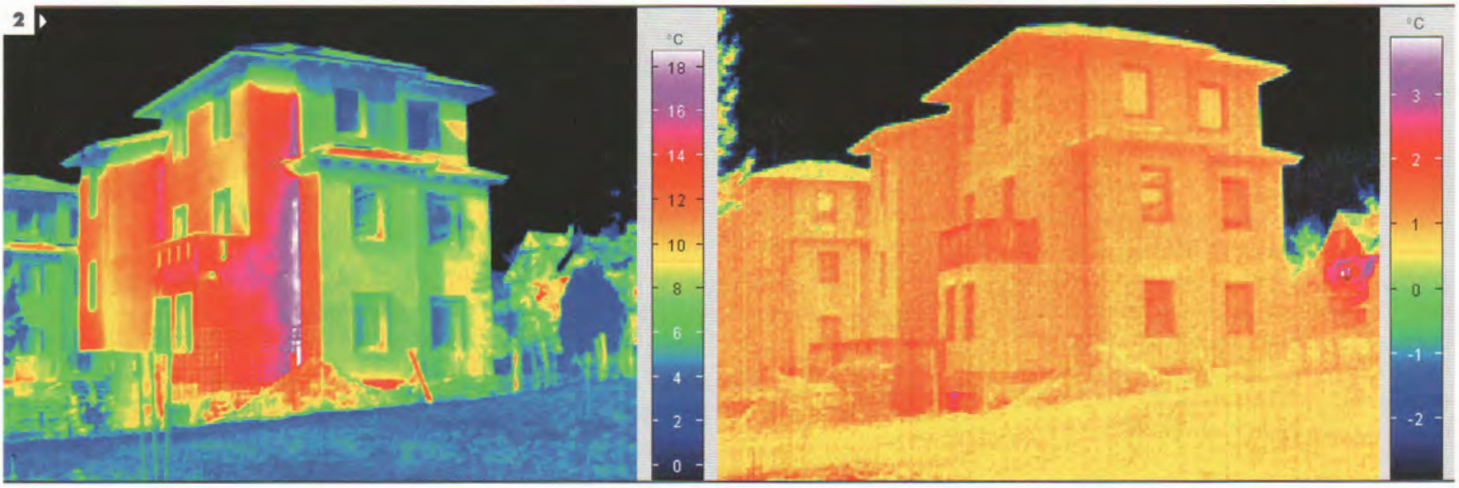
Ha szeretnénk megmérni egy tízemeletes panelházat, akkor az épület felső emeleteinek méréséhez (kb. 30 méter magasságban) jó 60-70 m távolságból kell dolgoznunk a kép minél kisebb geometriai deformációja (a perspektivikus hatás elkerülése) érdekében. „Pythagoras szerint" a hőkamera és a tárgy közötti távolság ilyenkor 67-76 m, tehát 1,3-1,4 mrad felbontású hőkamerával (ez a legtöbb professzionális kamera standardlencsével elérhető geometriai felbontása) az elemi mérőpont 87-106 mm átmérőjű, a legkisebb mérhető tárgynak tehát 261, illetve 318 mm-nél nagyobbnak kell lennie! (Emlékeztetőül: egy ablakkeret ritkán szélesebb 70 mm-nél). Szükséges tehát egy teleobjektív alkalmazása, amellyel (kameratípustól függően) 0,2-0,5 mrad geometriai felbontás áll rendelkezésünkre.

Képpontok száma

A geometriai felbontáson túl a hőkamerával elérhető képminőséget – illetve pontosabban a mérés részletességét – a hőkamera képpontjainak száma határozza meg. Ennek oka, hogy a grafikai felismerhetőség érdekében egy bizonyos

A napsütés hatása.

2



Napközbeni épületfelvétel (befejezetlen építkezés)
• a nap hősugárzása visszaverődik az épület falain,
• a falak melegnek tűnnek, holott nincs is fűtés!

Épületfelvétel három órával napnyugta után
• a nappali napsütés felmelegítő hatása
már csak alig vehető észre, most tehát mérhetünk

minimális képpontszámnak kell a mérendő tárgy egyes részeire esnie ugyanúgy, ahogyan ezt a digitális fényképezés esetén megszoktuk. Könnyen érthető, hogy több képpont esetén a tárgyfelületet nagyobb részletességgel, illetve nagyobb tárgyfelületet ugyanolyan részletességgel jeleníthetünk meg egyetlenegy hőképen. Ha kevés a képpontok száma, akkor sok felvételt kell készíteni, és összefüggő tárgyak kiértékeléséhez, illetve a beszámolók készítéséhez gyakran szükségessé válik a képek montírozása (ami igen időigényes munka).

Hőkamerák esetén ez a kérdés nem is jelentéktelen. Míg a digitális fényképezőgépeknél 5, 6, 7 vagy akár több mint 10 Mpixeles (10 millió képpontos) felbontásról beszélünk, mátrixos hőkamerák esetén a képpontok száma tipikusan 320x240 (tehát 76 800) képpont. Vannak kisebb képességű kamerák is (gyakori típus a 160x120, tehát csupán 19 200 képpontos), amelyek ennél fogva csak kisebb felületek elfogadható részletességű megjelenítésére képesek, ami a felhasználási területüket természetesen erősen korlátozza (cserébe nagyon kedvező az áruk). A hőkamerák érzékelői fejlődésének köszönhetően egyre több képpontú hőkamerák készülnek. Elfogadható áron kaphatók 384x288 elemi érzékelőt tartalmazó érzékelő mátrixszal rendelkező hőkamerák, sőt akár 640x480 képpontos érzékelő mátrixos készülékek is (méghozzá 50, illetve 60 Hz-es képfrissítéssel).

Épület-termográfia esetén elfogadható képminőséget (pontosabban: részletességet) érünk el, ha egy 320x240 képpontos hőkamerával legfeljebb 2 emeletnyi falrészletekről készítünk „áttekintő" hőképeket, ilyenkor ugyanis 25 milliméterenként készül egy-egy képpont (ne felejtsük el: átlagolással!). Ez a kamera lencséjétől függően – normál objektív esetén – tipikusan 15 m mérési távolságot jelent (1,5 mrad geometriai felbontás mellett a képpont-méret ilyenkor 22,5 mm, tehát a legkisebb – pontosan mérhető – tárgyak mérete 67,5 mm!). A részletek rögzítéséhez pedig közelebbről vagy teleobjektívvel kell további felvételeket készítenünk.

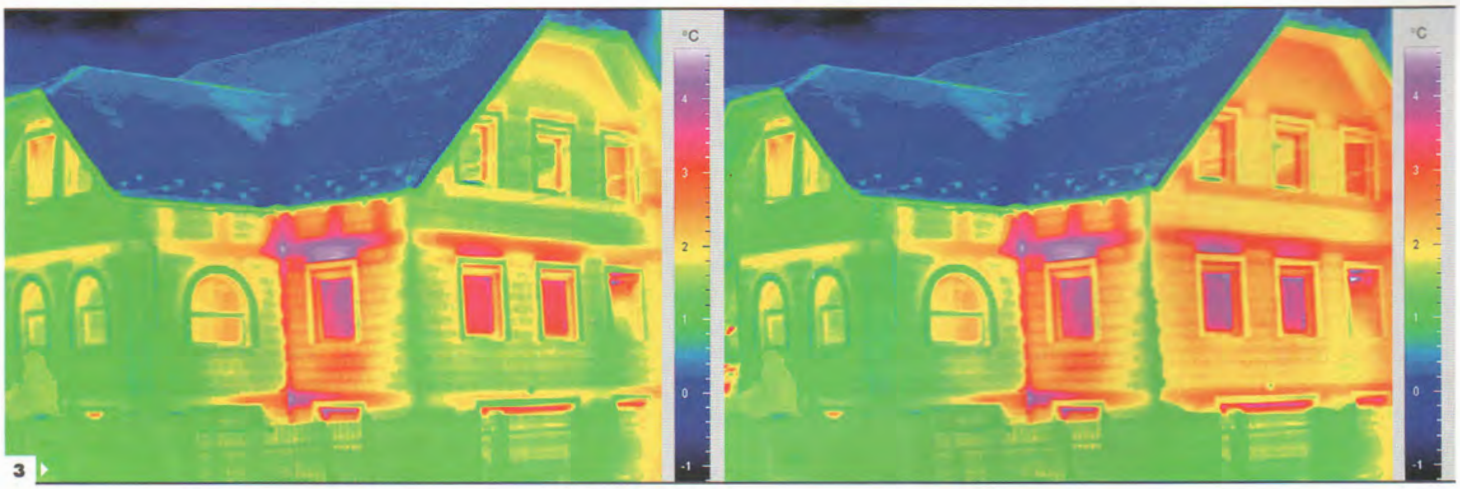
Az épület-termográfia különlegességei

Az épület-termográfia elsődleges célja az épületek hőszigetelésének objektív és tel-

A szél hatása. Erős szélben elvégzett termográfiai felmérés
• a szél elviszi a hőt a jobboldali falról, így az hűvösebb
• úgy tűnik, mintha jobb lenne a jobb oldali
fal hőszigetelése a hőkép közepén látható falfelületnél

Ugyanez a mérés szélcsendben
• látszik, hogy a jobb oldali fal hőszigetelése ugyanolyan gyenge,
mint a hőkép közepén lévőé (és ugyanolyan erős hőhídakkal rendelkezik)
Megjegyzés mindkét hőképhez: az épület bal oldali része nincs fűtve (lépcsőház)

3



jes körű állapotfelmérése. De soha ne felejtsük el, hogy a termográfiai mérés a felületek hőmérsékletének pillanatfelvételét szolgálja, amelyet a legkülönbözőbb mérési körülmények befolyásolnak. Épületekkel kapcsolatosan alapvetően a következő termográfiai eljárásokat különböztetjük meg egymástól:

Kvantitatív (mennyiségi, számszerű) termográfiai vizsgálatok

A kvantitatív épület-termográfia célja az épület teljes felületi hőeloszlásának értékelése és a hővezetési együttható meghatározása (például hőveszteség vagy fűtési energiaszükséglet számításakor). Mivel az együttható csak igen korrekt (abszolút pontosságú) hőmérsékletadatok alapján számítható ki, a hőkamerával végzett adatgyűjtéssel kapcsolatosan nagyon szigorú feltételeket kell teljesíteni. Az eljárásra jellemzők a következők:

- a nagy kiértékelési igény,
- erős korlátok az évszak, a napszak és az időjárás szempontjából,
- csak több esőmentes nap után és szélcsendben végezhető el,
- csak állandósult hőáramlási feltételek mellett alkalmazható (kora reggel vagy késő este),
- viszonyítási alapok meghatározásához kiegészítő beltéri mérések is szükségesek.

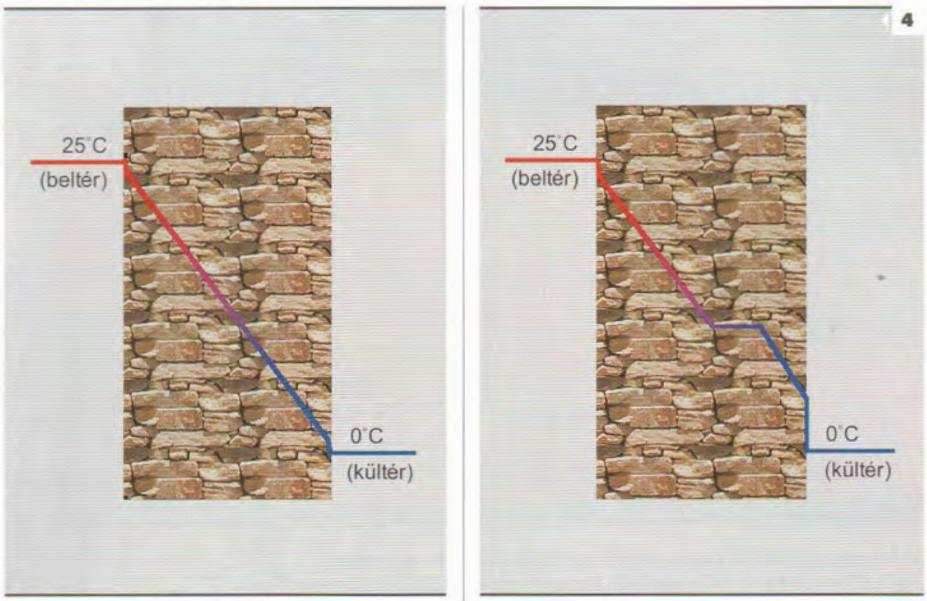
Kvalitatív (minőségi, általános) termográfiai vizsgálatok

A kvalitatív hőkamerás épületvizsgálat célja az épület hőhídjainak és hőszigetelési „hibáinak" (minőségi eltérések) keresése és dokumentálása. A legtöbb probléma kellően nagy hőmérséklet-felbontó képességű hőkamerával megjeleníthető hőkülönbségek alapján deríthető fel, az abszolút (számszerűen egzakt) hőmérséklet-adatoknak ilyenkor csak kisebb szerepük van. Az eljárás jellemzői az alábbiak:

- a kevesebb korlátozás a mérési feltételekkel szemben,
- gyengébb korlátok az évszak, a napszak és az időjárás szempontjából,
- csak esőmentes napon és szélcsendben végezhető el,
- csak állandósult hőáramlási feltételek mellett alkalmazható (kora reggel vagy késő este).

Mind a kvantitatív, mind a kvalitatív termográfiai épületvizsgálatok során bel- és kültéri vizsgálatokat egyaránt érdemes elvégezni. Sőt, a kvantitatív vizsgálatok esetén gyakorlatilag kötelező a beltéri mérések elvégzése, mivel csak így számítható ki az egyes felületek hőáramlási tulajdonsága. Táblázatunk áttekintést nyújt a bel- és kültéri mérések során figyelembe veendő mérési feltételekről, valamint a mérések kivitelezése közötti különbségekről (nehézségekről).

Erős nappali felmelegedés hatása.



Külső fal ideális hőgradiense (stacionáris állapot):
- **beltéri (mérhető) falhőmérséklet: 21 °C**
- **kültéri (mérhető) falhőmérséklet: 3 °C**

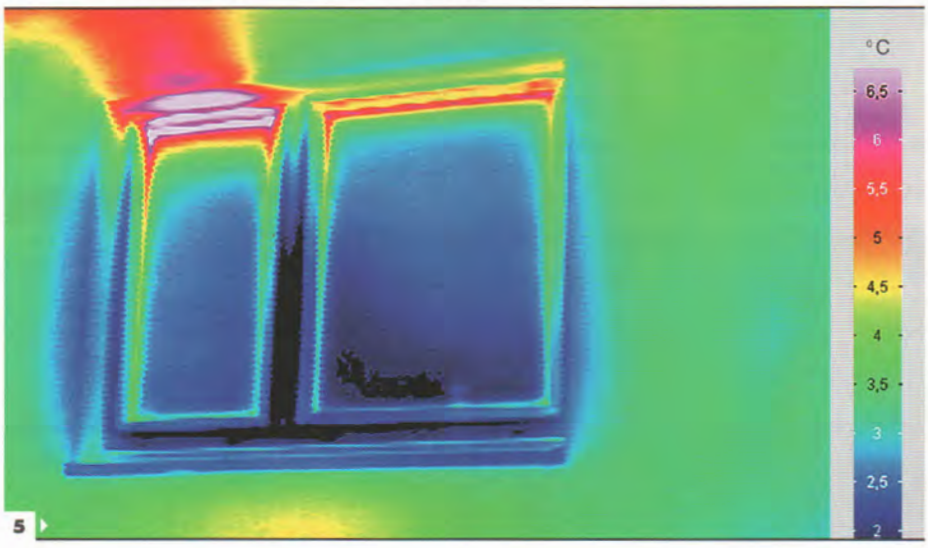
Erős nappali felmelegedés utáni éjjeli állapot:
- **beltéri (mérhető) falhőmérséklet: 21 °C**
- **kültéri (mérhető) falhőmérséklet: 8 °C**

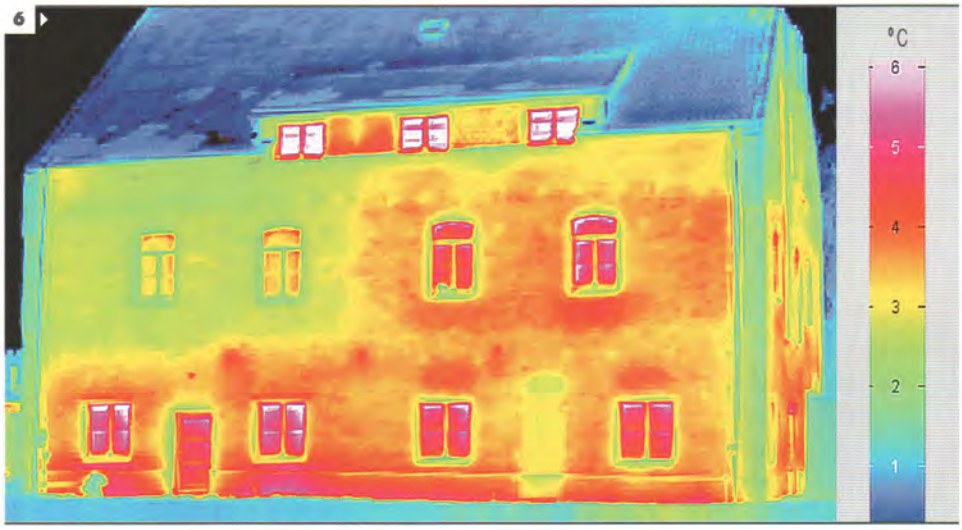
Megjegyzés: a jobb oldali ábrán látható vízszintes szakasz a nappali (ideiglenes) felmelegedés hatásának eredménye. Az ábra az esti (külső hőmérséklet visszahűlése után kialakult) hőgradienst mutatja be. A külső falfelület megemelkedett hőmérséklete ahhoz a téves következtetéshez vezet, hogy rossz a hőszigetelés, vagy hőhíd van jelen, holott ugyanolyan falszerkezetet feltételeztünk, mint a bal oldali ábra esetén.

Javasolt mérési körülmények és feltételek

Ahhoz, hogy a hőkamerával ne csak „szép színes" képeket készítsünk a bevizsgálandó épületről, hanem az épí-

Nyitva felejtett nyílászáró hatása:
A bal oldali ablak a mérés előtt még „bukóra" volt kinyitva, látszik a kiáramló meleg levegő hatása az ablakkereten és a fölötte levő falon. Az ablak állapotáról, illetve az áthidaló hőszigetelési tulajdonságáról így nincs mód korrekt értékelésre.





Fűtés hiányának hatása. A képen látható ház egyik szobája vagy lakása (baloldalt fent) nincs fűtve. Hőszigetelési és egyéb építészeti hibákat ilyenkor (erről a szobáról, illetve lakásról) természetesen nem lehetséges kimutatni.

tész, az energetikus, a statikus és az üzemeltető által kiértékelhető – helyes következtetésekre alapot adó – hőképek készüljenek, a következőkben felsorolt minimumfeltételeknek kell teljesülniük.

- A külső felvételek a kora reggeli vagy késő esti órákban (napsütéstől mentes napszakokban) készüljenek, száraz időjárásban, szélcsendben (legfeljebb gyenge szél, <2 m/s szélerősség).
- A kül- és beltéri hőmérséklet közötti különbség legalább 15-20 K legyen.
- A beltér egyenletesen legyen felfűtve (belső ajtók nyitva), szigorúan zárt külső nyílászárók mellett.
- A fűtés automatikus éjjeli üzemmódja (ha van) ki legyen kapcsolva (tehát a teljes fűtés üzemeljen).

Ebből következik, hogy az épület-termográfia csak a fűtési szezonban, megfelelően hideg (5 °C alatti) időjárás esetén kivitelezhető.

A hőkamera-rendszerrel szemben támasztott követelmények összefoglalása

A megfelelő minőségű, kiértékelhető hőképek készítésekor magával a hőkamerával szemben is igen komoly elvárások lépnek fel, amelyek betartása nélkül csak felismerhetetlen, hibahelyeket kimutatni nem képes hőképeket kapunk. A hőkamerának minimálisan teljesítenie kell a következő felsorolás első hat pontját:

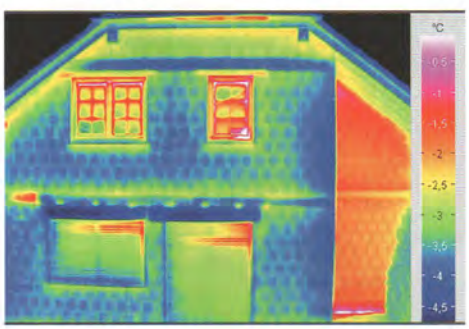
- nagy termikus felbontás (-0,08 K vagy jobb),
- minél több képpont (minimum 320x240 pixel),
- alacsony zajszint, jó jel-zaj viszony (a -40 °C-tól kalibrált kamerák teljesítik ezt),
- hőmérséklettartomány -20 °C-tól 100 °C-ig (jobb, ha -40 °C-tól),
- üzemi hőmérséklet tartománya -10 °C-tól (jobb, ha -20 °C-tól),
- nagy geometriai felbontás (1,5 mrad vagy jobb),
- bizonyos mérésekhez teleobjektív,
- könnyű kezelhetőség (pl. autom. fókusz),
- nagy tárolási képesség (lehetőleg minimum 200 hőkép),
- sokoldalú kiértékelő és dokumentáló PC-szoftver (2., 3., 4., 5., 6. ábra).

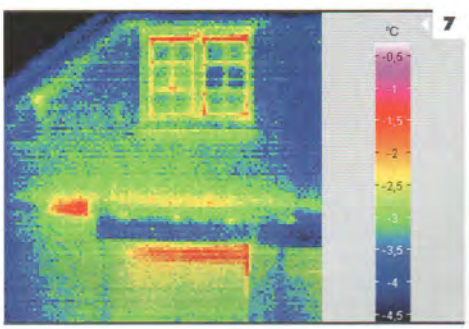
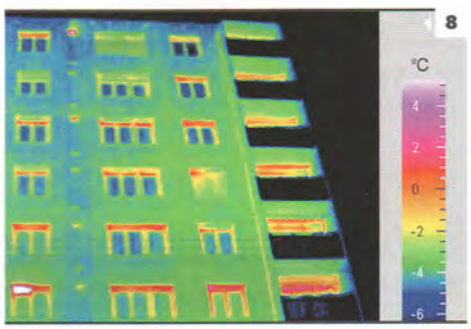
Mivel az emissziós tényező sajnos függ a látószögtől is, figyelembe kell vennünk, hogy minél jobban eltér a látószög a derékszögtől, annál inkább növekvő reflexió figyelhető meg. Leginkább ívelt felületű tárgyak mérése esetén figyelhetjük meg ennek hatását, de pl. magas házak felső emeleteinek mérésekor is szemben állunk eme problémával: látszólag a felső emeletek egyre hűvösebbek (pedig a valóságban inkább egyre melegebbek). Ennek magyarázata az, hogy az égbolt (felhők nélkül -273 °C) egyre erősebben tükröződik a ház külső felületén, hiába körülbelül 95%-os a szilikátalapú építőanyagokból álló falfelületek emissziós tényezője (8. ábra).

A geometriai felbontáson túl a hőkamerával elérhető képminőséget – pontosabban a mérés részletességét – a hőkamera képpontjainak száma határozza meg. Míg a digitális fényképezőgépeknél 5, 6, 7 vagy akár több mint 10 Mpixeles (10 millió képpontos) felbontásról beszélünk, mátrixos hőkamerák esetén a képpontok száma tipikusan 320x240 (tehát 76 800 képpont). Vannak kisebb képességű kamerák is – gyakori a 160x120 felbontású típus (csupán 19 200 képponttal) –, melyek ennél fogva csak kisebb felületek elfogadható részletességű megjelenítésére képesek. A következő hőképek látványosan mutatják a képpontok számának hatását a hőkép részletességére (7. ábra). *(Folytatása következik!)*

Rahne Eric
okl. villamosmérnök (BME)
rezgésdiagnosztikai szakértő
termográfiai szakértő
(Termograph Level3)

A hőkamera képpontszámának hatása.
Családi ház hőképe: a bal oldali hőképen a felvétel professzionális (383x284 képpontos, 80 mK hőmérséklet-felbontású) hőkamerával történt, a jobb oldalon kisebb képességű (120x160 képpontos, 120 mK hőmérséklet-felbontású hőkamerával dolgoztak.





Az emissziós tényező látószögfüggésének hatása [PIM]