

# SZEMÉLYEK DETEKTÁLÁSA HŐMÁTRIX SENZORRAL ÉS HIERARCHIKUS KLASZTEREZÉSSEL

## HUMAN DETECTION USING THERMAL ARRAY SENSOR AND HIERARCHICAL CLUSTERING

Drenyovszki Rajmund<sup>0000-0002-9462-2729</sup> <sup>1\*</sup>, Zsupányi Krisztián<sup>0000-0001-5094-9095</sup> <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Informatika Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország  
<https://doi.org/10.47833/2023.2.CSC.026>

### **Kulcsszavak:**

jelenlét érzékelés,  
személyek számlálása,  
hőmérséklet mátrix szenzor,  
hierarchikus klaszterezés,  
IR szenzor

### **Keywords:**

occupancy detection,  
people counting,  
thermal array sensor,  
hierarchical clustering,  
IR sensor

### **Cikktörténet:**

Beérkezett 2023. október 10.  
Átdolgozva 2023. november 20.  
Elfogadva 2023. november 25.

### **Összefoglalás**

*Az intelligens eszközök egyre fontosabb funkciója a jelenlét érzékelése és a személyek számának megállapítása. Kutatásunkban erre a célra egy iroda mennyezetén elhelyezett hőmérséklet mátrix érzékelőt használunk. A jelenlévő személyek számának meghatározásához egy küszöbérték alapú hierarchikus klaszterezési eljárást alkalmazunk, amely normál körülmények között nagyon megbízhatóvá teszi a sikeres észlelést.*

### **Abstract**

*Occupancy detection and people counting are increasingly important capabilities for smart solutions. For this purpose, in our research we use a thermal sensor array placed on the ceiling of an office. To determine the number of people present, we use a threshold based hierarchical clustering method, which makes successful detection very reliable under normal conditions.*

## 1. Bevezetés

A jelenlét érzékelés annak a megállapítása, hogy valaki jelen van-e egy szobában vagy irodában. Tisztázni kell, hogy ez több, mint egyszerű mozgásérzékelés, mivel statikus, nem mozgó személyek jelenlétét is meg akarjuk határozni. A jelenlét érzékelésén túl a személyek számának megállapítása is fontos funkció lehet az intelligens alkalmazásokban.



1. ábra. Példa a Melexis TSA érzékelőjére [1].

\* Kapcsolattartó szerző.  
E-mail cím: Drenyovszki.rajmund@gamf.uni-neumann.hu

Például a jelenlét-alapú szellőztetés [2] megvalósítása növelheti a komfortérzetet az irodákban, lakásokban és lakóépületekben. A kényelem mellett az egészségre is hatással van, például a megnövekedett CO<sub>2</sub>-szint káros, amely a megfelelő szellőzésvezérléssel elkerülhető. A CO<sub>2</sub>-szint közvetlen mérése és a foglaltság becslése [3] lehetséges, azonban a késleltetett észlelés miatt nem használható megelőző szabályozásra.

A passzív infravörös (PIR) érzékelők [4] már régóta használatosak a biztonsági rendszerekben [5], de korlátozottan alkalmasak a foglaltság érzékelésére, és nem adnak információt a jelenlévők számáról. Feltéve, hogy van mozgás, a PIR-érzékelő kimenete jelzi a jelenlétet. A jelenlét és az emberek számának pontos érzékelésére kifinomultabb érzékelők használhatók, pl. kamera, LIDAR-érzékelő és fotocella.

Kutatásunkban erre a célra egy hőmérséklet mátrix érzékelő (angolul TSA - Thermal Sensor Array) használunk. A TSA érzékeli (1. ábra) a felület több pontjáról érkező távoli infravörös sugárzást (FIR - Far Infrared Radiation). Egyszerűbben fogalmazva, a TSA érzékelő egy alacsony felbontású hőkamera. A gyártótól és a kialakítástól függően különböző felbontással (pl. 8x8 vagy 24x32), látószöggel (55°, 60°, 110°) és hőmérséklet-érzékelési tartománnyal (pl. 0°C-tól 80°C-ig) kapható. Például a mennyezetbe szerelt, lefelé irányított TSA érzékelővel megállapítható akár a helyiségben tartózkodó emberek száma is az általuk kibocsátott hő alapján. A következő fejezetben áttekintést nyújtunk a TSA szenzorral történő jelenlét érzékelés szakirodalmáról.

## 2. Szakirodalom áttekintése

A nagy felbontású hőkamerák alkalmasak egy helyiségben tartózkodó személyek számának meghatározására, és különösen hatékonyak a kültéri alkalmazásokban [6], de magas árak miatt nem alkalmazhatók tömegesen és széles körben. Ilyen célokra néhány éve már rendelkezésre állnak kisebb, megfelelő felbontású és alacsony költségű hőérzékelők. A következőkben áttekintjük a kutatási területünk szempontjából legfontosabb eredményeket. A szakirodalom bemutatását olyan eljárásokra és algoritmusokra korlátozzuk, amelyek kis felbontású TSA szenzorokat használnak a jelenlét, illetve a jelenlévő személyek számának meghatározására.

Alacsony felbontású vizuális és infravörös kamerák kombinációját használják az első tanulmány [7] szerzői a személyek számának megállapításra. A kísérleteket kombináltan egy 320x240 pixeles kamerával és egy 16x16 pixeles IRISYS IRI 1001 hőkamerával végezték, aminek látószöge 20°x20°. A vizuális képeket először átméretezik, majd a referenciaképek felhasználásával küszöbértéket határoznak meg, majd egy RAM-alapú neurális hálózattal (NN) dolgozzák fel. Az infravörös képeken átlagértékek felhasználásával küszöbértéket határoznak meg, és 1 rejtett rétegből álló NN (280 neuron Sigmoid függvény) bemenetére adják. A vizuális algoritmus hibája 10% körüli, az infravörösé pedig 5%, sőt a szerzők 18 kísérlet eredményei alapján azt állítják, hogy a két kamera kombinálásával ez 3%-ra csökkenthető. Sajnos az eredmények nem ellenőrizhetők, mivel az algoritmust nem mutatják be.

A [8] cikk szerzői egy 16x16 pixeles infravörös kamerát (IRISYS IRI 1011) alkalmaznak egy helyiség foglaltságának megállapítására. Az alkalmazott hőkamerás eszköz fő korlátja a szűk, 20°-os látószög. A mérések során az infravörös kamera rögzített helyzetben van, a helyszín és a kamera közötti szög közel 90°. Az algoritmus első lépése az átméretezési művelet (bikubikus interpoláció) a méret és a minőség növelése érdekében. A következő lépés a háttér kivonása, amelyet a Laplacian of Gaussian (LoG) blob felismerés követ, majd a területet személyek becsült területéhez igazítjuk. A foglaltságot a különböző képi régiókban mérik a kép területekre való felosztásával. Az algoritmust és a tesztelési környezetet MATLAB-ban (képfeldolgozási eszköztár) implementálták. Az eredmények ígéretesek, azonban a szerzők a hibaarányokra vonatkozóan nem adtak meg adatokat.

A [9] című tanulmány célja a kutatási területen korábban használt algoritmusok pontosságának javítása a környezet hőmérséklet-változásainak figyelembevételével (amelyeket a légkondicionáló rendszerek, a készülékek és a napfény visszaverődése okoz). A szerzők módszere egy adaptív háttérbecslést és egy Kalman-szűrőn alapuló zajeltávolítási technikát használ ki a Panasonic által kifejlesztett, 8 x 8 pixeles Grid-Eye [5] hőérzékelővel (60°-os látószöggel). A rendszer validálásához az érzékelőt 2,7 m magasságban, a mennyezetre szerelték fel, így a padlón 9 m<sup>2</sup>-es területet lefedve. A kapott eredmények azt mutatják, hogy a technika jelenlegi állásához képest javult az jelenlét érzékelés pontossága, különösen zajos környezet esetén, elérve a 97%-os pontosságot.

További érdekes forrás a [10] cikk, ami egyrészt mások korábbi eredményeit mutatja be, másrészt közvetlenül a bejáratokban (ajtókeret felső részében) elhelyezett szenzorok alkalmazását javasolja. Eredményeik ígéretesek, azonban elképzelésük a több be- és kijáratral rendelkező helyiségek esetén többlet problémákat (pl. telepítési és beállítási) vet fel.

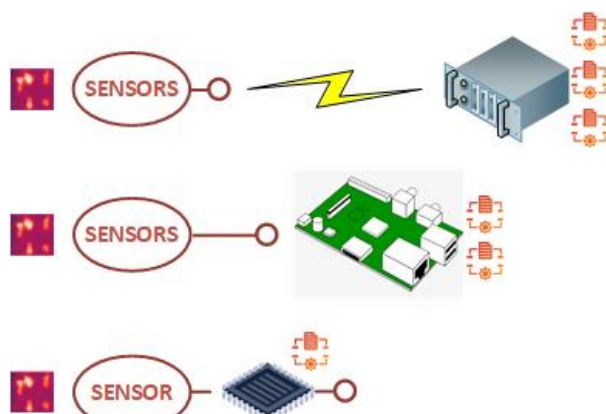
A szakirodalom áttekintése után megállapíthatjuk, hogy a plafonról lefelé irányított hőmátrix szenzor alkalmazása elfogadottá kezd válni a jelenlét, valamint a jelenlévő személyek számának megállapítására, de sajnos a legtöbb esetben a szerzők nem adják közre a mérési adatsorokat és az algoritmusok leírása sem teszi lehetővé azok implementálását. Célunk, hogy egy új, nem túl bonyolult algoritmus bemutatásán túl annak kódját is közreadjuk, illetve rendelkezésre bocsássuk a mérési adatokat is, hogy mások is ellenőrizni tudják eredményeinket, illetve fel tudják azokat használni további kutatásokban.

### 3. Felhasznált eszközök és módszerek

A következőkben bemutatjuk a szenzoradatok feldolgozásának lehetséges technikai megvalósítási lehetőségeit, valamint a jelenlét megállapítására alkalmas hőmátrix szenzorokat. A TSA szenzorok működési elve is röviden ismertetésre kerül.

#### 3.1. Szenzorról érkező adatok feldolgozása

A feldolgozó algoritmus futhat technikailag távol vagy közel a szenzortól (2. ábrán összefoglalva). Egy eszköz felküldi a képet egy dedikált szerverre (lokális hálózaton vagy Interneten keresztül) és ott dolgozza fel azt a szerveren futó algoritmussal. A második, hogy egy okos eszköz (pl. Raspberry Pi mikroszámítógépet) található a szenzor mellett és azon fut a feldolgozó szoftver, illetve a legintegráltabb megoldásként a szenzorral kvázi egybeépítve valósítjuk meg a feldolgozást egy mikrovezérlőn (pl. ESP32).



2. ábra. Szenzorról érkező adatok feldolgozása

Az algoritmusunk fejlesztéséhez az első megvalósítást használtuk, azzal a módosítással, hogy a szerverre nem egy direkt, élő kapcsolaton keresztül kerülnek fel a hőképek, hanem offline módon, a lementett hőképeket elemezzük a Google Colab környezetben megírt Python nyelven készült algoritmussal. Ennek előnye, hogy kiegészítésekkel (webszerver, FastAPI vagy hasonló keretrendszer) rögtön használatba vehető akár éles alkalmazásként is. Későbbi célunk az, hogy a kifejlesztett algoritmust mikrovezérlőn is implementáljuk, mivel a célgépben alkalmazás egyértelműen megköveteli a helyi feldolgozást és a vezérlő, illetve szabályozó jel integrált felhasználását.

1. Táblázat. Szenzorról érkező adatok feldolgozása

	Előnyei	Hátrányai
<b>dedikált szerver</b>	Sok szenzor kezelhető Implementáció sokféle nyelven lehetséges Active learning lehetséges	Ha a kommunikációs csatorna nem él, nem működik Vezérléshez/szabályozáshoz visszafelé is kommunikálni kell

	Saját, bérelt vagy felhőben lévő szerver	
<b>mikroszámítógép</b>	Több szenzor kezelhető Implementáció több nyelven lehetséges	Ha a kommunikációs csatorna nem él, nem működik
<b>mikrovezérlő</b>	Feldolgozási lehetőség a célgépben Kommunikálni csak az eredményt kell	Egyetlen szenzor kezelhető Implementáció nyelve korlátozott (C/C++)

### 3.2. TSA szenzorok

Jelenleg több gyártó TSA szenzora érhető el, például a Panasonic kínálatában Grid-EYE kódnévvel, a Melexis MLX90640 típuszámmal, míg a Heimann többféle kivitelben is gyártja azokat. A Heimann professzionális, nagy felbontású eszközöket is kínál, illetve egyedi megrendelés alapján különleges paraméterekkel rendelkező szenzorokat is gyárt. A 2. táblázatban azokat a típusokat soroltuk fel, amik a mi alkalmazásunkhoz kellően nagy látószöggel (Field of View - FoV) rendelkeznek, így kimaradtak a Heimann kínálatában elérhető 8x8 és 16x16 pixel mérettel rendelkezők.



3. ábra. TSA szenzorok

Típus	Felbontás	FPS	Hőmérséklet tartomány	Látószög	Érzékelési távolság
Panasonic Grid-EYE AMG8833, AMG8834	8x8	1 vagy 10	0°C-80°C	60°	7m
Melexis MLX90640 xxA altípus	32x24	0.5...64	-40°C-300°C	110°x75°	n.a.
Heimann HTPA32x32d	32x32	2...27	-20°C-1000°C	90°, 93°, 105°	
Heimann HTPA80x64d	80x64	1...41	-20°C-1000°	120°x90°, 90°x70°	

### 3.3. Működési elv

A thermopile hőelemek érzékelik az elektromágneses sugárzást, amelyet bármely olyan tárgy vagy test felülete bocsát ki, amelynek hőmérséklete meghaladja az abszolút nulla fokot (-273,15 °C). Ez a sugárzás szélesávú spektrális eloszlással rendelkezik, amely függ a kibocsátó test felületi hőmérsékletétől, és a Plancks-féle sugárzási törvénnyel írható le. A magasabb felületi hőmérsékletnek két hatása van. Először is, a teljes kibocsátott energia megnő. Ezt a Stefan-Boltzman-törvény írja le.

A kibocsátott energia az abszolút (K) hőmérséklet 4. hatványával arányosan nő. Ezért egy kicsit magasabb tárgy hőmérséklet egy kicsit magasabb sugárzási szintet fog generálni. Az abszolút

hőmérséklet kis változása a kibocsátott energia nagyobb változásával a 4. hatványfüggés miatt könnyebben észlelhető hőmérséklet különbségeket eredményez.

Másodszor, a sugárzás spektrumának csúcs hullámhossza magasabb hőmérsékleten rövidebb hullámhosszra tolódik. Ezt a Wiens-féle elmozdulási törvény írja le.

A legtöbb hőmérséklet mérésnél a 0°C és 1000°C közötti tartományban a csúcs hullámhossz és így a kibocsátott sugárzás nagy része a közép- és távoli infravörös tartományban van, amely - a meghatározástól függően - 3  $\mu\text{m}$  és 15  $\mu\text{m}$  között van.

Négy elemet kell figyelembe venni. Először is, a sugárforrás. Ez az a tárgy, test vagy felület, amely a felületi hőmérséklete miatt infravörös sugárzást bocsát ki. Másodszor, az infravörös sugárzás a sugárforrásból a légkörön keresztül terjed az érzékelő felé. Mielőtt a sugárzást az érzékelő elem érzékeli, az infravörös optikával manipulálható. Az optika a harmadik elem, amely szűrőből és/vagy lencséből állhat. Az utolsó elem a tényleges infravörös érzékelő, amely a beérkező sugárzást jellé alakítja, általában egy feszültségértékké, amely alkalmas a megjelenítésre vagy további értelmező jelfeldolgozásra és cselekvésre.

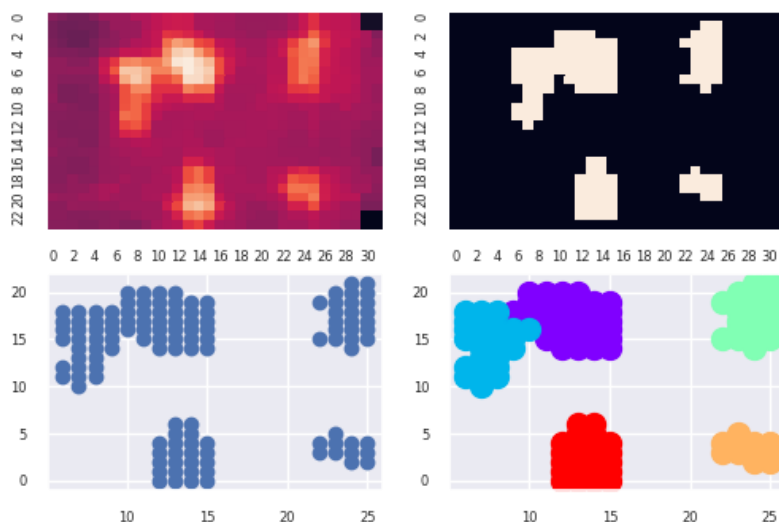
Az infravörös sugárzás a sugárzási képesség, némi légköri abszorpció és az optikai elemek áteresztése miatt csökkentve végül eléri a hőérzékelő elemünket. Most megnézhetjük, hogyan működik egy termopile érzékelő. A beérkező sugárzás (hő) kimenő jellé (feszültség) történő átalakítása a termoelektromos hatáson, más néven Seebeck-effektuson alapul. A termoelektromos hatás a töltéshordozóknak egy elektromos vezetőben a hőmérséklet különbségek miatt bekövetkező szétválását írja le. Ha a vezető egyik oldalán magasabb a hőmérséklet, mint a másik oldalon, a töltések egyensúlya megbomlik. A töltésszétválás mértéke az anyagtól függ, és a termoelektromos együtthatónak nevezett konstans.

#### 4. Az algoritmus működése

Az algoritmus Python nyelven lett implementálva a Google Colab környezetben. Az algoritmus működése egyszerű, lépései a következők:

1. Szenzorról érkező adat formátumának módosítása,
2. Küszöbszint alapján a kép binarizálása: összes képkocka 0 és 1 értékkel történő helyettesítése,
3. A binarizált képből x, y koordináta párok generálása,
4. Hierarchikus klaszterezési algoritmus meghívása.

Az algoritmus lépéseinek egyes kimeneteit a 4. ábrán láthatjuk. Bal felső kép a szenzorról érkező adatok megjelenítése hőtérkép (heatmap) formájában. A jobb felső kép a binarizálás eredménye. A bal alsó képen láthatjuk a binarizált képből x, y koordináta párok generálása utáni állapotot, míg a jobb alsó kép a hierarchikus klaszterezési eljárás kimenete alapján megjelölt klaszterek láthatók.



4. ábra. Algoritmus lépéseinek kimenete

Az algoritmus a scikit-learn gépi tanulási könyvtárán alapul. A felhasznált hierarchikus klaszterezési eljárást a *sklearn.cluster.AgglomerativeClustering*. A futtatási környezet program csomagjainak verziószámai a 5. ábrán láthatók (lekérdezhető a Google Colab környezetben a *sklearn.show\_versions()* függvény futtatásával). A *AgglomerativeClustering* eljárás használható arra, hogy megfelelő paraméterek megadása mellett a klaszterek számát is megkapjuk automatikusan.

```
System:
python: 3.7.15 (default, Oct 12 2022, 19:14:55) [GCC 7.5.0]
executable: /usr/bin/python3
machine: Linux-5.10.133+-x86_64-with-Ubuntu-18.04-bionic

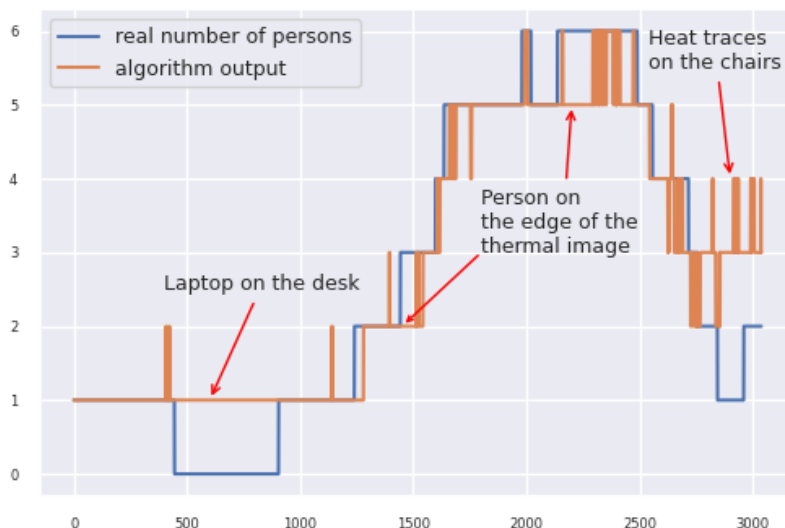
Python dependencies:
pip: 21.1.3
setuptools: 57.4.0
sklearn: 1.0.2
numpy: 1.21.6
scipy: 1.7.3
Cython: 0.29.32
pandas: 1.3.5
matplotlib: 3.2.2
joblib: 1.2.0
threadpoolctl: 3.1.0

Built with OpenMP: True
```

5. ábra. Verziószámok a Google Colab futtatási környezetben

## 5. Eredmények bemutatása

Az algoritmus teszteléséhez egy tárgyalóban helyeztünk el az asztal és ezáltal az ülő személyek felett a plafonon egy Melexis (MLX90640 xxA altípus) 110°x75° látószöggel rendelkező szenzort. A mérési sorozatot úgy végeztük el, hogy az asztalra helyeztünk egy bekapcsolt laptopot, majd elhagytuk a helyiséget. Ezek után egyesével, összesen hat személy ült be a tárgyalóba, majd egyesével el is hagyták azt. A 6. ábrán a mérési sorozat eredményeit láthatjuk. A tárgyalóban jelen lévő személyek valódi számát a kamera- és a hőkép alapján kézzel vettük fel, ami kék színnel lett megjelölve.



6. ábra. Az algoritmus érzékenysége a hőmérséklet paramétertől

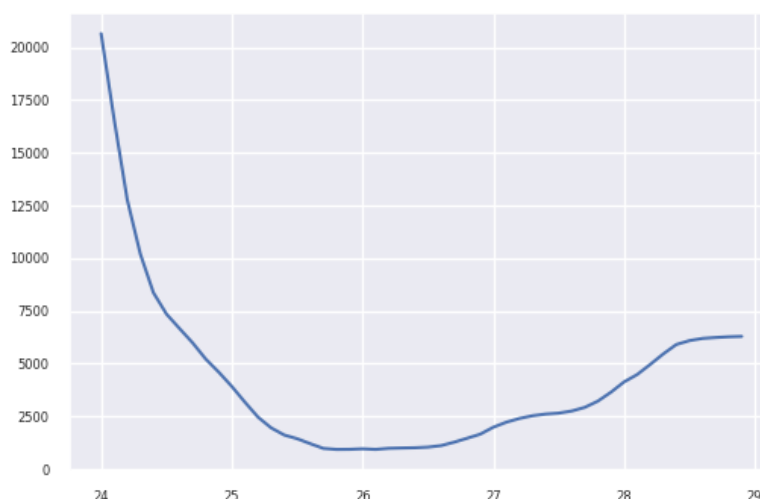


Az algoritmus által megállapított személyek számát pedig narancssárga színnel láthatjuk. Az ábrán jól megfigyelhetők az eltérések a valódi és az algoritmus által visszaadott személyek számában. Az eltérések alapvetően három okra vezethetők vissza:

1. a laptop hőképe személynek lett számlálva,
2. a szenzor által fedett terület szélén bizonytalan (hol látszik, hol nem) az elhaladó személy hőképe,
3. távozáskor a székről felállva a személyek ott hőnyomot hagynak.

A mérési sorozat (csv formátum) és az algoritmus (Google Colab notebook) megtalálható a következő oldalon: <https://github.com/drajmund/research/tree/main/occupancy-detection-people-counting>

Az algoritmus futásakor két paraméter befolyásolja alapvetően a teljesítőképességet, azaz a jelenlévő személyek valódi és az algoritmus által becsült számának eltérését, amit hibaarányal is számszerűsíteni lehet, például átlagos abszolút hiba (MAE – Mean Absolut Error) felhasználásával. Az egyik paraméter a binarizálási lépéshez használt hőmérséklet küszöbérték. A másik, az agglomeratív klaszterezési algoritmus bemenő paramétere, ami az automatikus klaszterszám megállapítását lehetővé teszi, a távolság küszöb (distance threshold) érték: távolság küszöbérték, amely felett a klaszterek nem egyesülnek, és ez mutatja meg azt a határt, amelynél a dendrogram fát el kell vágni. A hőmérséklet küszöbértéket megvizsgálva a 26-os érték lett felhasználva az eredményekhez. A 7. ábrán láthatjuk a MAE hibaarány függését a küszöbértéktől. A kísérletek alapján a távolsági küszöböt (distance threshold) 20-ra állítottuk.



7. ábra. Az algoritmus érzékenysége a hőmérséklet paraméterre

## 6. Összefoglalás, további kutatási tervek

Cikkünkben a jelenlét érzékelését és személyek számának megállapítását vizsgáltuk meg. A szakirodalom áttekintését követően, bemutattuk a felhasználható szenzorok körét, azok mérési adatainak feldolgozási lehetőségeit, majd pedig a működési elvüket. Algoritmusunk a szakirodalomban található algoritmusokhoz képest egyszerű, egy küszöbérték alapján binarizált képen található vélhetően összetartozó képpontokat határozza meg agglomeratív klaszterezés felhasználásával. Az eredmények ígéretesek a mérési sorozat alapján, bár a zavaró hatások kiküszöbölése nem minden esetben lehetséges. A kutatásunk folytatásaként egyrészt szeretnénk a méréseket körét kibővíteni többféle méretű és jellemzővel rendelkező helyiségre, másrészt több szenzorra is. Terveink között szerepel továbbá egy beágyazott elektronika elkészítése és azon beágyazott szoftverként az algoritmusunk C nyelven történő implementálása.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a projektben résztvevő intézmények - AIRVENT ZRT és a Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar - kollégáinak. Köszönettel tartozunk

a kutatás támogatásáért, amely a **“Széles körben használható levegő sterilizáló megoldások kifejlesztése intelligens működés optimalizáló vezérléssel 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2021-00294”** pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] <https://www.melexis.com/>
- [2] Leephakpreeda, Thananchai, Thitipatanapong, Raksit, Grittiyachot, T & Yungchareon, V. (2001). Occupancy-based control of indoor air ventilation: A theoretical and experimental study. *Science Asia*. 27. 279-84. 10.2306/scienceasia1513-1874.2001.27.279.
- [3] A. Franco, F. Leccese, L. Marchi, Occupancy modelling of buildings based on CO2 concentration measurements: an experimental analysis, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1224 (2019) 012016.
- [4] S. Narayana, V. Prasad, V. Rao, P. Venkata, S. Kowshik, M. Iyer, (2015). PIR sensors. 142-153. 10.1145/ 2737095.2742561.
- [5] U. Sanikommu, Pir sensor based security system, *Ann Robot Automation*. (2020) 022–024.
- [6] I. Lahouli, Z. Chtourou, R. Haelterman, G. De Cubber, R. Attia, A Fast and Robust Approach for Human Detection in Thermal Imagery for Surveillance Using UAVs, in: 2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), IEEE, Hammamet, 2018: pp. 184–189.
- [7] I.J. Amin, A.J. Taylor, F. Junejo, A. Al-Habaibeh, R.M. Parkin, Automated people-counting by using low-resolution infrared and visual cameras, *Measurement*. 41 (2008) 589–599.
- [8] M. Berger, A. Armitage, Room occupancy measurement using low-resolution infrared cameras, in: *IET Irish Signals and Systems Conference (ISSC 2010)*, IET, Cork, Ireland, 2010: pp. 249–254.
- [9] A.A. Trofimova, A. Masciadri, F. Veronese, F. Salice, Indoor Human Detection Based on Thermal Array Sensor Data and Adaptive Background Estimation, *JCC*. 05 (2017) 16–28.
- [10] C. Perra, A. Kumar, M. Losito, P. Pirino, M. Moradpour, G. Gatto, Monitoring Indoor People Presence in Buildings Using Low-Cost Infrared Sensor Array in Doorways, *Sensors*. 21 (2021) 4062.