

# Lítium akkumulátor töltőállomások tűzvédelmi monitorozása – kémiai folyamatok korai detektálása infravörös hőkamerás technológiával

## Fire protection monitoring of lithium battery charging stations – early detection of chemical processes with infrared thermal imaging technology

Iváncsik Renátó

Email: ivancsik.r@gmail.com

ORCID: 0009-0009-8971-5013 

szerző

### Absztrakt:

Az elektrifikáció és a modern automatizációs folyamatok térnyerése a raktározási iparágban teljesen új típusú, fokozott tűzvédelmi kockázatokat indukál. A lítium-ion alapú akkumulátorok töltése során fellépő belső elektrokémiai minőségromlások és meghibásodások – mint például a nem megfelelő üzemi körülmények miatti dendritképződés és az abból fakadó belső mikrorövidzárlatok – olyan kontrollálhatatlan, öngyorsító exoterm láncreakcióhoz, úgynevezett termikus megfútáshoz (thermal runaway) vezethetnek, amely robbanásszerű tüzesetet eredményez. A hagyományos füst- és hőérzékelő rendszerek reakcióideje reaktív jellegük miatt strukturálisan elégtelen ezen folyamatok időbeni detektálásához, mivel jelzésük a már kifejlett, előrehaladott fázisra korlátozódik. Jelen tanulmány egy olyan integrált, prediktív – tűzvédelmi metodikát mutat be, amely a hosszúhullámú infravörös (LWIR) hőkamerás képalkotó diagnosztikára és intelligens videóanalitikai (VCA) algoritmusokra épül. A technológia képes a rendellenes hőmérséklet-emelkedést már a korai, látens szakaszban (70–110 °C között), a gázképződés (venting), és a pirolízis megjelenése előtt, milliszekundumok alatt pontosan azonosítani. A kutatás részletesen elemzi a bispektrális képfúzió, a dinamikus ROI-zónázás és a mesterséges intelligencia alapú trendanalízis gyakorlati előnyeit. A dolgozatban bemutatott szabadtéri esettanulmány és ellenőrzött égési teszt igazolja a hőkamerás rendszer hatékonyságát, amely a kritikus termális anomáliák korai kiszűrésével szignifikáns időelőnyt biztosít a reaktív rendszerekkel szemben. Az eredmények alapján strukturált automatizált beavatkozási mátrix humán mulasztás nélkül, közvetlen technológiai leállítással és kényszerszellőztetéssel akadályozza meg a tűzterjedést. Kifejlett tűz esetén az infravörös tartomány sajátosságai a sűrű füstön és lángokon keresztül látás révén hatékony oltásirányítási támogatást nyújtanak a tűzoltó erők számára a tűzfészek pontos lokalizálásával, növelve a beavatkozási állomány biztonságát. A tanulmány kitér a beruházás gazdasági validációjára, valamint a jövőbeli fejlesztési lehetőségekre, mint a hőkamerás monitoring és a belső akkumulátor-felügyeleti rendszerek (BMS) biztonsági adatintegrációja.

**Kulcsszavak:** lítium-ion akkumulátor, termikus megfúvás, hőkamerás diagnosztika, prediktív tűzvédelem, oltástámogatás

### Abstract:

The expansion of electrification and modern automation processes introduces entirely new types of elevated fire safety risks within the warehousing industry. Internal electrochemical degradation and failures occurring during the charging phase of lithium-ion batteries—such as dendrite propagation caused by improper operating conditions and subsequent internal micro-short circuits—can trigger an uncontrollable, self-accelerating exothermic chain reaction known as thermal runaway, resulting in explosive fires. Due to their inherently reactive nature, the response times of conventional smoke and heat detection systems are structurally insufficient for the timely detection of these processes, as their signaling is limited to the fully developed, advanced phases. This paper presents an integrated, predictive fire protection methodology based on Long-Wave Infrared (LWIR) thermal imaging diagnostics and intelligent Video Content Analysis (VCA) algorithms. This technology is capable of identifying abnormal temperature rises within milliseconds during the early latent phase (between 70–110 °C), well before the onset of gas generation (venting) or pyrolysis appear. The research thoroughly analyzes the practical benefits of bispectral image fusion, dynamic Region of Interest (ROI) zoning, and AI-based trend analysis. The outdoor case study and controlled burn test presented in the paper validate the efficacy of the thermal imaging system, which provides a significant time advantage over reactive systems by filtering out critical thermal anomalies at an early stage. Based on these findings, a structured automated intervention matrix eliminates human error, mitigating fire propagation through direct technological shutdown and emergency forced ventilation. In the event of a fully developed fire, the specific physical properties of the infrared spectrum provide effective tactical command support for firefighting forces by enabling vision through dense smoke and flames to precisely localize the fire core, thereby enhancing responder safety. Finally, the study addresses the economic validation of the investment and proposes future development vectors, such as the safety data fusion of thermal monitoring with internal Battery Management Systems (BMS).

**Keywords:** lithium-ion battery, thermal runaway, thermal imaging diagnostics, predictive fire protection, firefighting support

## 1. BEVEZETÉS

A modern logisztika középpontjában a hatékonyság folyamatos növelése, ezzel együtt az automatizáció áll. Az elektrifikáció térnyerésével azonban új típusú tűzvédelmi kockázatok jelentek meg, hiszen míg az áruk útját informatikai rendszerekkel másodpercre pontosan követjük, a fizikai biztonsági rendszerek gyakran percekkal maradnak le például egy akkumulátor kritikus kémiai bomlási folyamata mögött. Tapasztalataim azt mutatják, hogy az üzemeltetők a tűzvédelmet sokszor csak jogszabályi kényszernek tekintik, amely valódi értéket nem teremt. Jelen pályázati munka megírását és témaválasztását egy konkrét ipari katasztrófa inspirálta, hiszen hiába jelzett a tűzjelző, egyik partnerünk teljes raktárbázisa semmisült meg egy töltés alatt álló targonca akkumulátortüze miatt.

Az eset kapcsán kezdtem el gondolkodni a jelenlegi biztonsági protokollok kritikus hiányosságán, amely alapján arra következtettem, hogy a hagyományos tűzjelző rendszerek reakcióideje elégtelen a molekuláris szinten induló, gyors lefolyású elektrokémiai folyamatok időbeni észleléséhez. Az akkumulátorok töltése ugyanis egy összetett kémia folyamat, mely folyamatban, ha sérülés vagy hiba következik be, akkor az egy kontrollálhatatlan folyamatot eredményez. A legnagyobb technológiai kihívást a detektálási időrés jelenti, hiszen, mint a raktárbázis tüzeseténél láthatjuk, a jelenlegi rendszerek sokszor már csak a kifejlett tüzet jelzik, amikor a folyamat megállítása szinte lehetetlen. A pályázati munkám keretén belül a hőkamerák képalkotó diagnosztikáját vizsgálom, mint olyan prediktív eszköz, amely képes az exoterm folyamatokat még a pirolízis és lánggal égés megjelenése előtt azonosítani. A munka célja egy integrált biztonsági szemlélet bemutatása, mely segítségével képesek lehetünk megelőzni a katasztrófát, míg egy esetleges tűzoltói beavatkozás során segítséget tudunk nyújtani a rendszerrel a tűzfészek pontos helyszínéről, így növelve az oltás hatékonyságát és a beavatkozási állomány biztonságát.

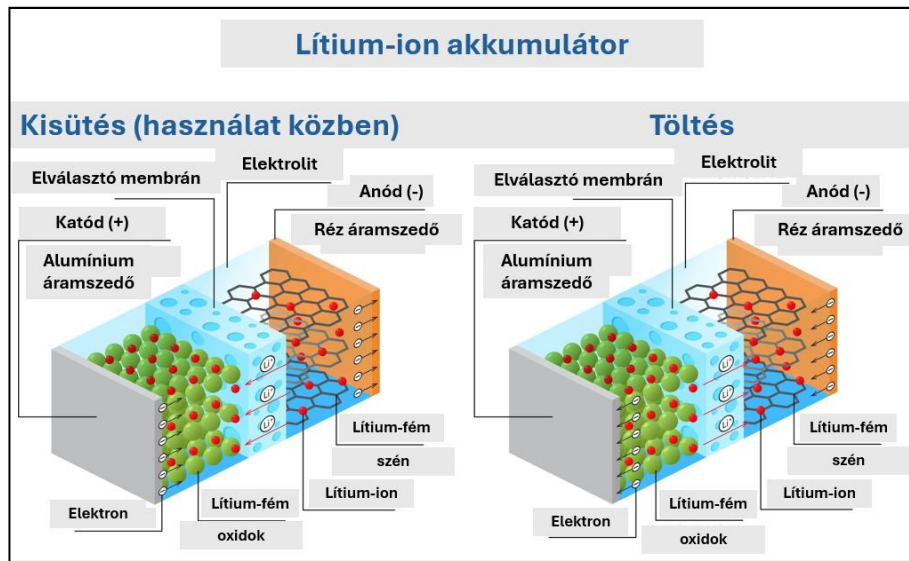
## 2. A LÍTIUM ALAPÚ AKKUMULÁTOROK ISMERTETÉSE

Maga a lítium, mint anyag egy fémes formában instabil, öngyulladásra már normál légköri viszonyok mellett a levegő oxigén és páratartalmától hajlamos, ezért az akkumulátorokban vegyületként alkalmazzák. A lítium-ion akkumulátor (LIB<sup>1</sup>) ezért nem tekinthető statikus energiatárolóként, sokkal inkább egy elektrokémiai rendszer. Tűzvédelmi és tűzveszélyességi szempontból azért különleges, mert a cella belsejében nagy energiasűrűségű oxidálószer (elektrolit) és üzemanyag (anód, katód) található meg egymástól elválasztva egy közös térben [1]. A lítium-ion akkumulátorok működési elve a lítium-ionok két elektróda közötti oda-vissza vándorlásán alapul.

A töltési folyamat során a lítium-ionok pozitív fém-oxid katódból a szerves elektroliton keresztül a negatív, grafit alapú anód rétegei közé vándorolnak és épülnek be. Kisütéskor ez a folyamat teljes egészében megfordul, az anódban tárolt ionok a katód felé áramlanak, elektromos munkát végezve. Amíg a folyamat sikeresen a tervezett hőmérsékleti határokon belül marad, addig a kémia reakciók reverzibilisek. Biztonságtechnikai szempontból a kockázat az, ha rendszer bármi féle belső hiba, vagy külső behatás hatására átlép egy visszafordíthatatlan kémiai bomlás fázisába [2], [3].

---

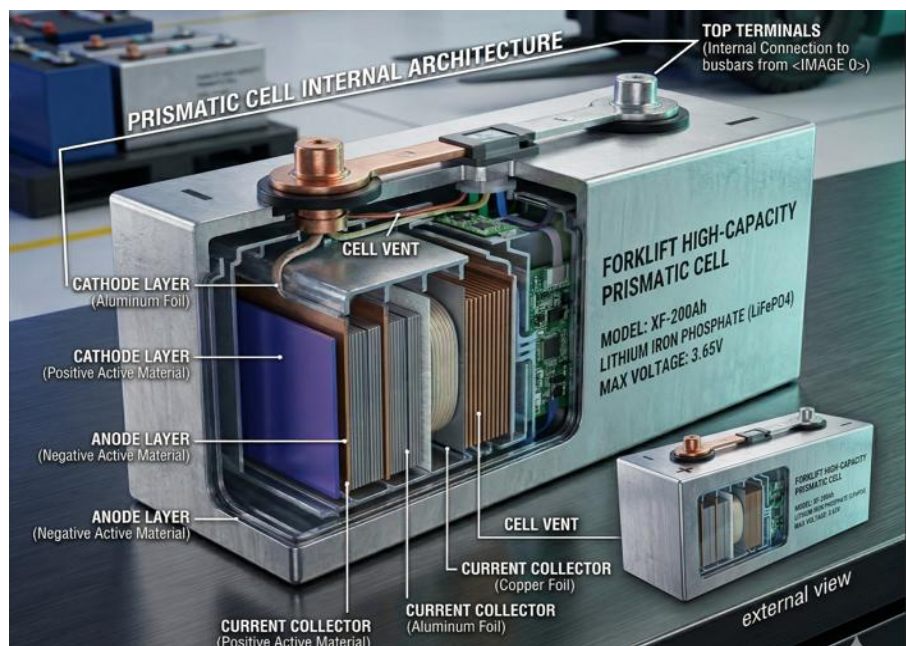
<sup>1</sup> Lítium-ion akkumulátor (Lithium-Ion Battery) angol rövidítése.



1. ábra A lítium-ion cella elektrokémiai működési elve töltés és kisülési fázisban (Forrás: [1] és [4] alapján készítette a szerző)

## 2.1 A cella geometriai kialakítása

A lítium-ion akkumulátorok fizikai szerkezete nem csupán egy egyszerű gyártástechnológiai kérdés, hiszen ez az architektúra az, ami alapvetően meghatározza a hő terjedésének útvonalát és detektálhatóságát a belső elektrokémiai folyamatok során. Mind logisztikai, mind pedig biztonságtechnikai szempontból a targonca-akkumulátoroknál a legelterjedtebb típus a prizmatikus cella kialakítás, melyek merev – többnyire alumíniumból vagy acélból készült házzal érkeznék [5].



2. ábra Prizmatikus akkumulátor-cella metszeti rajza (Forrás: [5] és [4] alapján készítette a szerző)

A képen látható robusztus kialakítás az, ami biztosítja a kiváló szilárdtest-vezetési tényezőjét, ami mérnöki szempontból annyit tesz, hogy a belső, molekuláris szintű anomáliák – mint például az elválasztó réteg sérülése vagy a dendritképződés okozta lokális Joule hő viszonylag rövid időn belül megjelenik a cella külső felületén. A hot-spotok, azaz forró pontok detektálása így könnyebb lokalizálást tesz lehetővé a hőkamerás képalkotás számára, ugyanis a fémes burkolat szinte azonnal kiközvetíti a belső kémiai instabilitás termikus jelenségét.

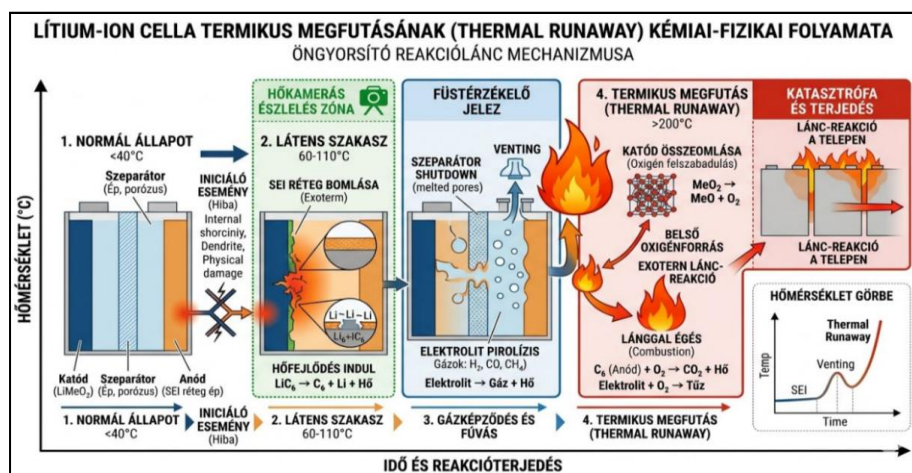
### 3. THERMAL RUNAWAY – TERMÍKUS MEGFUTÁS KÉMIAI ÉS FIZIKAI FOLYAMATA

A lítium-ion akkumulátorok üzemeltetéséhez kapcsolódó legnagyobb biztonsági kockázatot az úgynevezett thermal runaway, azaz termikus megfutas jelenti. Ez egy öngyorsító folyamat, egy exoterm kémiai láncreakció, mely során a cella belső hőmérséklete rendkívül rövid idő alatt, teljes mértékben kontrollálhatatlanul ugrik meg, majd ennek következeképp a tárolt kémiai energia robbanásszerűen alakul át lánggal égő tüzzé. A termikus megfutas nem egyetlen esemény, hanem egymásra épülő, teljes mértékben visszafordíthatatlan kémiai reakciók sorozataképp írható le. A folyamat öngerjesztő jellege az Arrhenius-törvényen alapszik, mely kimondja, hogy a hőmérséklet emelkedésével a kémiai reakciók sebessége exponenciálisan nő. Egy gyakori szabály szerint ez annyit tesz, hogy 10 °C-os hőmérséklet emelkedés körülbelül megkétszerezi az adott reakció sebességét [2]. A folyamat teljes mértékben kritikus a thermal runaway során, hiszen a targonca akkumulátorában zajló folyamat egy olyan pozitív visszacsatolási hurok, melyet az Arrhenius-törvény tart kézben:

1. Például egy belső zárlat miatt elindul egy kis melegedés, amely felgyorsítja az elektrolit bomlását
2. Mivel ez a bomlás exoterm folyamat, a reakció tovább emeli a cella belső hőmérsékletét -> Hőfelszabadulás
3. A magasabb hőmérsékleten az Arrhenius-törvény értelmében a bomlás még gyorsabb folyamatként megy végbe, ami ezáltal még több hőt termel. -> Exponenciális gyorsulás

A hőkamera szerepe ekkor igazán fontossá, hiszen a képalkotási diagnosztika lényege az lesz, hogy ezt a folyamatot még az exponenciális felfutas elején észlelje, hiszen amint a hőmérséklet eléri azt a pontot, ahol a reakciósebesség már drasztikusan megugrik, a folyamat teljes mértékben megállíthatatlan megfutasá válik [2].

#### 3.1. A termikus megfutas kronológiája – Kémiai eseménynaptár



3. ábra Termikus megfutas kémiai és fizikai folyamata (Forrás: [2] és [6] alapján készítette a szerző)

A 3. számú ábrán a termikus megfűtés időbeli lefolyásának kémiai és fizikai szakaszai látható. A folyamat egy indító – inicializáló eseménnyel indul el. Ilyen például egy dendrit okozta belső rövidzárlat. A diagnosztika szempontjából ez egy kifejezetten fontos szakasz – melyet az ábrán zöld keretezett színnel láthatunk. Ezt nevezzük látens szakasznak, ahol a SEI védőréteg exoterm bomlása már megkezdődik. Ekkor tapasztalható és látható külső jele nem jelentkezik a hibának, kizárólag a hőkamera általi monitoring lesz képes arra, hogy a rendellenes hőmérséklet-emelkedést detektálja, majd a hozzá kapcsolódó kapcsolási műveletet végrehajtsa. A kifűtés és a szeparátor shutdown ezután következő folyamat, mely folyamatokra a tűzjelző berendezéshez kapcsolt füstérzékelő már reagál. A visszafordíthatatlan pont az ábrán piros színnel van jelölve, ekkor történik meg a katód összeomlás, mely a szabad oxigént biztosítja az égés folyamatához [7].

### 3.2 A termikus megfűtés szakaszainak összehasonlító táblázata

Fázis megnevezése	Kritikus hőmérséklet tartomány	Kémiai folyamat leírása	Észlelhetőség/ Diagnosztika
1. Normál üzem	< 60 °C	Stabil, visszafordítható ionvándorlás az anód és katód között	Hőkamera: folyamatos üzemi hőmérsékletet detektál.
2. Látens szakasz	70 – 110 °C	A SI réteg bomlása, exoterm reakciók kezdődnek az anódon	Hőkamera: rendellenes hőmérsékletet észlel
3. Gázképződési szakasz	110 – 140 °C	Az elektrolit pirolízise. A Szeparátor pórusai összeomlanak. Belső nyomásnövekedés.	Hőkamera: kritikus forró pont, fizikai deformáció kezdete
4. Gázkifűtés	140 – 190 °C	A biztonsági szelep nyit. H <sub>2</sub> , CO, HF távoznak	Füstérzékelő: jelzést ad – fehér aeroszol. Hőkamera: érzékel a füstöt is.
5. Termikus megfűtés	> 200 °C	Katód összeomlás, szabad oxigén felszabadulás, Exponenciális hőmérséklet emelkedés	Hőérzékelő/ Sprinkler: Riasztás. Visszafordíthatatlan égési folyamat.
6. Láncreakció	> 400 °C	Lángolás, a hőterjedés áttérjed a szomszédos cellákra	Vizuális észlelés: Nyílt láng, sűrű füst. Katasztrofális tűz.

1. táblázat: A termikus megfűtés szakaszainak összehasonlító táblázata (Forrás: [3] és [7] alapján készítette a szerző)

## 4. ORSZÁGOS TŰZVÉDELMI SZABÁLYZAT ÉS TŰZVÉDELMI MŰSZAKI IRÁNYELVEK

Magyarországon az alapvető tűzvédelmi követelményeket a 54/2014 (XII. 5.) BM rendelet (OTSZ) határozza meg [8]. Erre az Országos Tűzvédelmi Szabályzat keretrendszer jellegű szabályozást ad, amelynek a gyakorlati megvalósítását a Tűzvédelmi Műszaki Irányelvek (TvMI) segítik [9], [10].

Az iparcsarnokok vonatkozásában figyelembe véve a szabályozási elveket azt mondható el, hogy annak mérete, a tárolt áruk értéke és az ott zajló technológiai folyamatok alapján a töltőállomásokat fokozottan tűzveszélyes területként kell azonosítani, majd kezelni.

**Kockázati egység:** A targoncatöltő állomásokat a raktár egyéb részeitől tűzgátló szerkezettel kellene leválasztani, de a minimum biztonsági szint eléréshez is már egy megfelelő védőtávolságot kell tartani és kialakítani a raktáron belül, hogy egy esetleges termikus megfutás ne terjedhessen át a raktárban található készletekre.

**Tűzterhelés számítása:** Az adott épület tűzállósági fokozatának meghatározását nagyban befolyásolják a targoncatöltő állomások, hiszen az akkumulátorok jelentős tűzterhelést jelentenek, ami abból adódik, hogy nem csak elektromos energiát, hanem éghető elektrolitot is tartalmaznak. Az elektrolit jelen helyzetben azért kritikus, mert megváltoztatja a tűz mind fizikai, mind pedig kémiai viselkedését. A számítás során az elektrolit tömegét és specifikus égéshőjét kötelező figyelembe venni, mert ez adja a potenciális tűz intenzitásának jelentős részét. Az elektrolit jelenléte miatt pedig érdemes elgondolkodni azon, hogy az akkumulátoros helyiségeket ne szimplán elektromos területként, hanem sokkal inkább vegyi raktárként kezeljük, mint kockázati egységet [8].

#### 4.1 TvMI 12.1 – Robbanás elleni védelem (ATEX szempontok)

**Gázkifúvás és zónabesorolás:** Amint azt feljebb, a kémiai eseménynaptárban is bemutattam, a termikus megfutás a gázkifúvás fázisában igen nagy mennyiségű hidrogént és más egyéb gyúlékony anyagot szabadít fel. A hidrogén jellemzője továbbá, hogy az alsó robbanási határértéke igen alacsony – csupán 4%, így a töltőhelyiségeknél érdemes vizsgálni, hogy van-e szükség a robbanásveszélyes zónák kijelölésére. Az MSZ EN-60079-10-1 szabvány szerint a robbanásveszélyes zónák kiterjedését nagyban meghatározza a szellőzési rendelkezésre állás, valamint annak hatékonysága [8], [10].

**Szellőztetés:** A szabályozás továbbá előírja, hogy a megfelelő mértékű akár természetes, akár mesterséges szellőztetést biztosítani kell, annak érdekében, hogy a gázkoncentráció az elvárt határérték alatt maradjon. Itt kapcsolódhat be a hőkamerás rendszer, mely a detektált hőmérséklet emelkedése alapján képes automatikusan indítani a szellőztető rendszer megfelelő fokozatát még azelőtt, hogy a gázkifúvás ténylegesen elkezdődne [8], [10].

Szellőzési fokozat	Mit jelent ez?	ATEX Zóna	Hőkamera szerepe
Alacsony	A levegő alig mozog, a gázok megrekednek a mennyezet alatt vagy a sarokban	Zóna 1 vagy 0: állandó vagy igen gyakori robbanásveszély	Kritikus: megmutatja az olyan hőcsapdákat, ahol a gáz is felgyűlne, így javítható a légáramlat.
Közepes	Normál üzemi szellőzés, ami képes a kisebb gázfeljődést elvezetni.	Zóna 2: Csak üzemzavar esetén veszélyes – akkor is rövid ideig.	Gyorsítás: A hőkamera jele alapján a rendszer intézkedni tud, mielőtt a gáz elérni a kritikus szintet.
Magas	Olyan erős légcserélés, ami azonnal felhígítja a gáz az alsó robbanási határ alá.	Nem veszélyes: Papíron megszűnik a robbanásveszély	Igazolás: Bizonyítani tudja, hogy a $t = 0$ rendszer reakcióidővel elkerülhetőek a drágább robbanásbiztos védelmek

2. táblázat: Szellőzési fokozatok és a hőkamera szerepe (Forrás: [8] és [10] alapján készítette a szerző)

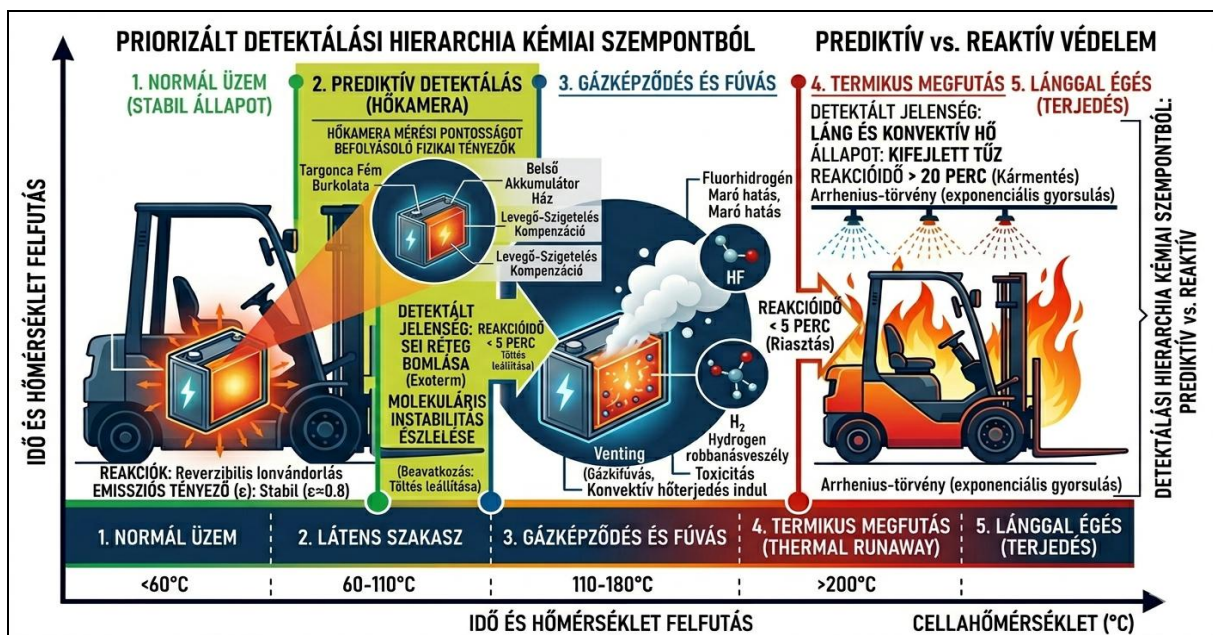
## 4.2 Tűzjelző berendezések tervezése és telepítése

Az OTSZ előírja a tűzjelző berendezések létesítésének kötelezettségét, a korábban említett technológiai fejlődéssel a szabályzás nem mindig tud lépést tartani. A probléma jelen helyzetben abból adódik, hogy a hagyományos füstérzékelők csak a pirolízis vagy a venting fázisában képesek megfelelő jelzést leadni [11]. Említsük meg, hogy a TvMI-k egyébként lehetőségek adnak a tervezettől eltérő megoldások alkalmazására, amennyiben igazolni tudjuk, hogy a kiválasztott technológia - egy hőkamerás biztonsági rendszer kiépítése magasabb szintű biztonságot nyújt. A TvMI 7.2 része meghatározza az érzékelők típusait, azonban, az akkumulátortüzeknél létezik egy igen kritikus időablak, amelyeket ezek a szabványos eszközök nem képesek lefedni [10].

**Hőkamera (IR):** A fénysebességgel terjedő elektromágneses sugárzást méri. Amint a targonca akkumulátorháza melegezni kezd, a kamera azonnal, milliszekundum alatt észleli ezt változást, melyet függetlenül tesz attól, hogy a mennyezet, vagy az adott pont milyen távolságra található, vagy épp merről fúj a szél a csarnokon belül. Elmondható tehát, hogy ez az egyetlen olyan eszköz, amely a pre-fire állapotot látja és képes jelezni. A TvMI 7.2 fejezete ugyanakkor nem csak az érzékelésről és detektálásról, hanem a különböző vezérlésekről szól. Ez azért fontos, mert a hőkamera jele alapján a tűzjelző központ irányába olyan preventív utasításokat tudunk elküldeni, melyeket egy normál füstérzékelő esetében már késő lenne megtenni. Ilyen egy technológia leállítás, ami a töltőáram azonnali megszakítását jelenti, vagy a szakaszolás, ami a tűzgátló ajtók bezárását jelenti még mielőtt a füst megjelenne. Illetve, a vészszellőztetés funkcióját is tudjuk indítani, ami pedig a robbanásveszélyes gázok hígítását biztosítja [10].

## 5. DETEKTÁLÁSI HIERARCHIA KÉMIAI ASPEKTUSAI

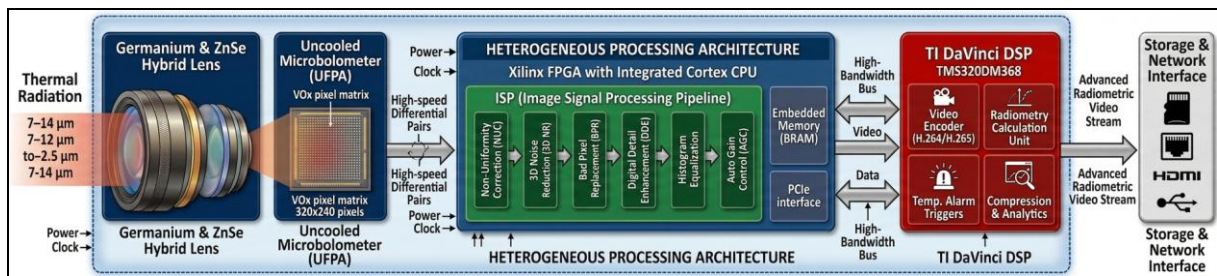
A hőkamerás képalkotó diagnosztika jelentősége véleményem szerint abban rejlik, hogy képes áthidalni azt a kritikus „időrést”, amely a belső molekuláris instabilitás kezdete és a látható tűz megjelenése között feszül. Míg a standard eszközök valamilyen reaktív módon a környezeti változásokra (füstkoncentráció, konvektív hő) várnak, a hőkamera prediktív módon, a burkolaton keresztül érzékelt szilárdtest-vezetési hő alapján azonosítja a veszélyt.



4. ábra Priorizált detektálási hierarchia kémiai szempontból (Forrás: [12] és [13] alapján készítette a szerző)

## 5.1 A hőkamerás képalkotás technikai folyamata

A hőkamerák működése a tárgyak és a környezet közötti sugárzáskülönbség detektálásán alapszik, mely elsősorban a 8–14  $\mu\text{m}$ -es távoli infravörös tartományban értelmezett. Az eszköz hőérzékelője (UFPA – Uncooled Focal Plane Array<sup>2</sup>) felfogja a beérkező hőszugárzást, majd egy speciális algoritmus segítségével a felületi hőmérsékletet szürkeárnyaltos digitális képpé konvertálja. A folyamat során az infravörös fény az optikán keresztül az érzékelőhöz jut el, ahol a digitális jelet úgy kapjuk meg, hogy az analóg jelet erősítés után digitalizáljuk. A végleges, nagyfelbontású videófolyamot egy FPGA (Filed-Programmable Gate Array)<sup>3</sup> alapú jelfeldolgozó egység hozza létre: ez végzi el a kép zajszűrését, a kontrasztoptimalizálást és a részletkiemelést, biztosítva a stabil és torzításmentes kimenetet a DSP alkalmazási réteg számára [14].



5. ábra A modern hőkamerák jelátviteli és képfeldolgozási architektúrája (Forrás: [14] és [15] alapján készítette a szerző)

A hőkamerás képalkotási mód egyik legnagyobb előnye, hogy teljesen érintésmentes módon képes a környezeti tényezőktől függetlenül (füst, köd vagy épp teljes sötétség) precíz adatokat biztosítani. A rendszer kimagasló képessége közé tartozik a valós idejű hőmérsékleti térképalkotás, mely során a hőkamerák élő képet képesek biztosítani a vizsgált területről, a kép minden egyes képpontjának hőmérsékleti adatainak önálló elemzésével. A különböző, de annál kritikusabb tűzvédelmi célpontok felügyeletét rugalmas mérési módok biztosítják, így a rendszert a megrendelő igényeinek megfelelően lehet beprogramozni. Ezt egészíti ki a kamerában található intelligens riasztási funkció, mely folyamatosan képes monitorozni a látómezőjében lévő tárgyak hőmérsékletét, és az előre beállított küszöbérték túllépése vagy rendellenes hőmérsékleti adatot detektálva (például hirtelen emelkedés) azonnali jelzést küld, vagy elindít egy automatizációs folyamatot. Ez az összetett megoldási lehetősége teszi lehetővé, hogy a tűzveszélyes gócpontokat gyors és hatékonyan azonosítsuk, így elérve azt, hogy a potenciális tüzeseteket még a lángra lobbanás előtti fázisban elhárítsuk [14].

## 5.2 Algoritmusok és Mesterséges Intelligencia

A hőkamerás megfigyelés és diagnosztikai rendszerek hatékonyságát a targonca-töltőállomások monitorozása során nem csupán az adott kamerában található szenzorok érzékenysége, hanem a mért adatok szoftveres interpretációja is biztosítja. A logisztikai csarnokok ugyanis dinamikus környezetként tekinthetők, ahol egy alap hőkép önmagában kevés egy pontos beavatkozáshoz, hiszen a fémes felületek reflexiója, a targoncák üzemi hőmérséklete vagy aktuális melegedése, illetve a környezeti hatások elrejthetik a valódi kémiai anomáliákat.

<sup>2</sup> A hőkamera képérzékelő szenzora, amely láthatatlan infravörös sugárzást elektromos jelekké, majd látható képpé alakítja át.

<sup>3</sup> Egy speciális integrált áramkör – azaz chip, amelyet a gyártás után a helyszíni adottságoknak megfelelően hardveres szinten lehet programozni.

A bispektrális technológia, valamint a mélytanuló algoritmusok erre a problémára kínálnak megoldást [16]. A bispektrális képfúzió egy olyan látásmód ugyanis, ahol a mérőeszközünk egyetlen kameraházban egyesít egy nagyfelbontású vizuális optikai szenzort és egy radiometrikus hőkamera detektort. A képi diagnosztizálás szempontjából ez a kettős lehetőség egy olyan technológiai megoldás, mely során a hőkamera nem csak egy piros – sárgás vagy épp fekete – szürke foltot mutat, hanem a hőterképet pontosan ráilleszti a normál látható tartományú videóra [14].

- **Vizuális azonosítás és kontextus:** Míg a hőkamera azonosítja a forró pontot a targonca akkumulátorházán, a vizuális csatorna biztosítja az objektum pontos azonosítását (pl. targonca rendszáma, töltőpont száma)
- **Körvonal-kiemelés:** A szoftver a vizuális kép éleit és részleteit átvetíti a hőterképre, így a képet elemző személy pontosan látja, hogy a melegedés a csatlakozónál (elektromos hiba) vagy az akkumulátorház egy konkrét pontján (dendrit okozta belső zárlat) jelentkezik.
- **Tűz és füst vizualizáció:** A bispektrális mód lehetővé teszi, hogy a rendszer egyszerre lásson át az LWIR tartományban a füstön, miközben a vizuális csatornán rögzíti a kármentéshez szükséges optikai bizonyítékokat [16].

### 5.2.1 VCA és a dinamikus zónázás

Hőkamerás rendszer alkalmazásakor nagy hangsúlyt kell fektetni a megbízhatóságra, mely a téves riasztások minimalizálását jelenti. Ekkor kerülnek képbe a VCA algoritmusok<sup>4</sup>, melyek lehetővé teszik a hőkamerák számára, hogy azok ne csak lássanak és mérjenek, hanem értelmezni is tudják a kapott információkat.

- **ROI – Region of Interest, azaz az intelligens zónázás,** mellyel elérhetjük, hogy a töltőállomások területén belül digitális maszkok (ezeken a részeken nincs szükség detektálására) és mérési zónák jelölhetőek ki. A szoftver csak a targonca kritikus akkumulátor-szekcióját figyeli, kizárva a látómezőből a fix hőforrásokat.
- **A dinamikus objektumkövetés** segítségével az AI alapú algoritmusok felismerik a targoncák alakját, így, ha az beáll a kijelölt töltési pontra a rendszer automatikus képes ráhelyezni a mérési keretet az akkumulátorra, vagy a töltőcsatlakozóra (vakar akár a teljes töltést biztosító szakaszra), függetlenül attól, hogy hol állt meg a kijelölt területen belül.
- **A téves riasztások minimalizálásához** hozzátartozik a zavaró források megszürése. A VCA képes megkülönböztetni hirtelen fellépő, de ártalmatlan hőjelenségeket (ilyen lehet egy elhaladó, még nem elektromos targonca kipufogógáza vagy motorja) a cellák belsejéből kiinduló, lassú, de folyamatos hőmérséklet-emelkedéstől.

### 5.2.2 AI alapú trendanalízis és prediktív riasztás

A Mesterséges Intelligencia alkalmazása az a plusz funkció, mely a hőkamerát a hagyományos mérőeszközök szintjéről a prediktív diagnosztikai eszközök szintjére képes emelni.

---

<sup>4</sup> Ezek az algoritmusok teszik lehetővé, hogy a kamera értelmezni tudja a látott eseményeket. VCA algoritmus segítségével automatikusan felismerhető egy releváns mozgás vagy állapotváltozás, mely alapján automatikus riasztás generálható, így csökkentve a biztonsági személyzet folyamatos monitorfigyelését.

Ennek eredményeképp a rendszer nem csak előre beállított fix hőmérsékleti küszöbérték elérését képes detektálni, hanem a melegedés sebességét is. A Delta T monitorozása folyamán amennyiben a hőmérsékleti görbe meredeksége exponenciális szakaszba lép, a riasztás már generálható és kiadható, amikor az akkumulátor valós hőértéke alacsonyabb, de a melegedés üteme már kémiai anomáliát jelez. Ezen kívül a korábban megemlített FPGA alapú jelfeldolgozás képes elvégezni a 3D zajcsökkentést és a kontrasztoptimalizálást is, így a 40mK érzékenységgű detektor jeleiből a mesterséges intelligencia képes kiszűrni a valós forró pontokat még egy esetlegesen alacsony hőmérséklet-különbség esetében is [14].

### 5.2.3 Beavatkozási mátrix és automatizált válaszreakciók

Az intelligens funkciók legfontosabb állomása a vezérlés, ahol a hőkamera algoritmusai közvetlen, valós időben képesek kapcsolatban állni a tűzjelző központtal és a teljes raktári informatikai hálózattal egyaránt. Ez a szoros integráció teszi lehetővé a szelektív leállítási funkcióját, amely egy adott hiba detektálása esetén nem a teljes raktárbázis működését állítja le és ezzel bénítja meg a komplett munkavégzést, hanem csupán az érintett targonca töltőállomásához kapcsolódó töltőáram körét szakítja meg. Amennyiben a hőkamera a gázfelhők spektrális abszorpciója alapján venting-közeli állapotot észlel, a vezérlés automatikusan képes aktiválni az ATEX-szabvány szerinti kényszerszellőztetést. Ez a művelet kritikus fontosságú a robbanásveszélyes hidrogénkoncentráció és egyéb gyúlékony gázok hígítása érdekében. Az összetett technológiai szintű vizsgálat és rendszerezés biztosítja, hogy prediktív védelmi rendszer alakulhasson ki, amely képes a molekuláris szintű hibákat, például a szeparátort átszűrő dendriteket makroszkopikus képi információvá és mérhető hőmérsékleti rendellenességgé alakítani. A rendszer így még a katasztrófa, vagyis a lánggal égés és a termikus megfutás bekövetkezése előtt képes olyan releváns válaszlépéseket adni, mellyel minimalizálni lehet az ipari létesítményt fenyegető károkat.

SZEMPONT	HŐKAMERA (IR)	FÜSTÉRZÉKELŐ (Optikai)	SPRINKLER / HŐÉRZÉKELŐ
DETEKTÁLÁSI ELV	Elektromágneses sugárzást mér (IR)	Aeroszol koncentrációt mér (Füst)	Konvektív hőátadást mér (Láng/Hő)
KÉMIAI FÁZIS	Látens szakasz (PRE-FIRE, SEI bomlás)	Venting (Gázkifúvás)	Égés és propagáció (Fully Developed Fire)
REAKCIÓIDŐ (Azonnali/Lassú)	Fénysebességű mérés (Azonnali)	Késleltetett (légáramlástól függ)	Nagyon lassú (fizikai hőhatástól függ)
MEGELŐZÉSI ESÉLY (Töltés leállítása)	KIVÁLÓ (>90%)	ALACSONY (<20%)	MINIMÁLIS (0%) - CSAK OLTÁS
GÁZOKON ÁTLÁTÁS (LWIR)	IGEN (bizonyos spektrumban)	NEM (füst elvakítja)	NEM RELEVÁNS
LÁNGON ÁTLÁTÁS (LWIR)	IGEN (LWIR tartományban)	NEM	NEM
VAKRIASZTÁS ESÉLYE	KÖZEPES (zónázással javítható)	ALACSONY	NAGYON ALACSONY
BERUHÁZÁSI KÖLTSÉG	MAGAS	ALACSONY	KÖZEPES-MAGAS

6. ábra Tűzvédelmi eszközök összehasonlító mátrixa (Forrás: [9], [11] és [14] alapján készítette a szerző)

## 6. GÁZOK ABSZORPCIÓJA ÉS LÁNGOKON KERESZTTÜLI LÁTÁS

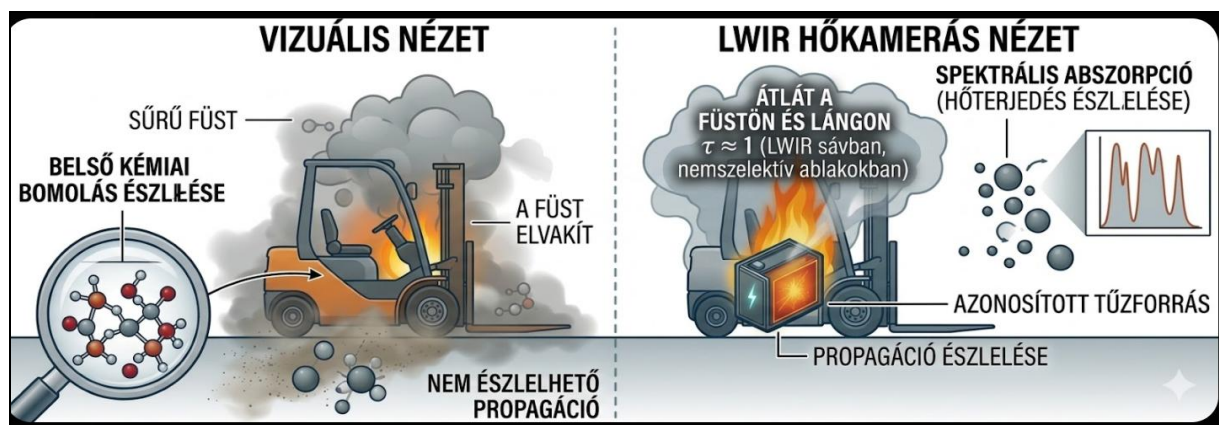
A hőkamerás diagnosztika létjogosultságát a lítium akkumulátorok felügyelete során nem csak a felületi hőmérséklet mérése adja, hanem a hőkamerák által használt infravörös tartomány sajátos fizikai tulajdonságai.

Ezek teszik lehetővé az adott folyamatok megfigyelését – detektálását szélsőséges, katasztrófa közeli körülmények között is. Amikor ugyanis egy akkumulátorcella például a termikus megfűtés állapotába kerül, sűrű és mérgező gázokat, valamint fehér füstöt bocsát ki. A hagyományos optikával felszerelt kamerák ebben a helyzetben szó szerint megvakulnak, hiszen a füstpartikulák mérete kisebb, mint az infravörös sugárzás hullámhossza.

A hőkamerák által kifejtett LWIR – azaz hosszuhullámú infravörös sugárzás ezzel szemben akadálytalanul hatol át a füstön, így a tűz pontos fészket és a hőterjedés irányát akkor is meg lehet határozni, amikor az adott helyiségen belül már nulla a látótávolság [18].

### 6.1 A gázok spektrális abszorpciójának mechanizmusa

A lítium-ion akkumulátorok termikus megfűtése során felszabaduló gázkeverék, mint az elektrolit-gőzök, a H<sub>2</sub>, CO, valamint a HF nem homogén módon viselkedik az infravörös tartományon belül. Fontos kiemelni ugyanakkor, hogy minden gázmolekulának van egy sajátos, olyan hullámhossz-tartománya, ahol az elektromágneses sugárzást elnyeli – azaz abszorbeálja. A különböző gázok detektálása szempontjából igen meghatározó a molekuláris szintű spektrális abszorpció, mely során a felszabaduló gázok, mint például a hidrogén-fluorid vagy a szén-monoxid – meghatározott hullámhosszokon képesek elnyelni az infravörös energiát. Ez a folyamat teszi lehetővé a hőkamerás diagnosztika számára, hogy a képi megjelenítés láthatóvá tegye a mérgező gázfelhők terjedését és koncentrációját azelőtt, még mielőtt a gyulladás megtörténne. A gázfelhő a háttérsugárzáshoz képest ilyenkor kontrasztos foltként jelenik meg a kijelzőn [18]. A teljes folyamat kiterjedésekor, mikor elérkezünk a nyílt lánggal égés szakaszához, a hőkamera kihasználja a transzmisszió elvét<sup>5</sup>, ugyanis a szénhidrogén alapú tüzek lángjainak tulajdonsága, hogy bizonyos spektrális ablakokban átlátszóak az infravörös tartomány számára. Miért is hasznos ez nekünk? – Azért, mert ez a lángon keresztüli látás teszi azt lehetővé, hogy a hőkamerás rendszer ne csak a lángok külső felületét, hanem a tűz tényleges középpontját meghatározza, valamint monitorozza a cellák közötti esetleges hőterjedést valós időben. Oltásirányításnál ez kritikus képesség, hiszen pontos információt kapunk arról, hogy a tűz mely szomszédos egységekre jelenthet veszélyt, mely következtében az automata rendszerek célzottan a legforróbb pontra koncentrálnak az oltás során felhasznált oltóanyagot, minimalizálva ezzel a felmerülő járulékos kockázatokat.



7. ábra Vizuális és LWIR hőkamerás megfigyelés összehasonlítása (Forrás: [14] és [13] alapján készítette a szerző)

<sup>5</sup> A transzmisszió elve leírja, hogy az elektromágneses sugárzás milyen mértékben képes áthaladni egy adott közegen anélkül, hogy ott elnyelődne, vagy visszaverődne.

## 7. A HIBA MECHANIZMUSA – DENDRITKÉPZŐDÉS ÉS A TERMIKUS ANOMÁLIA

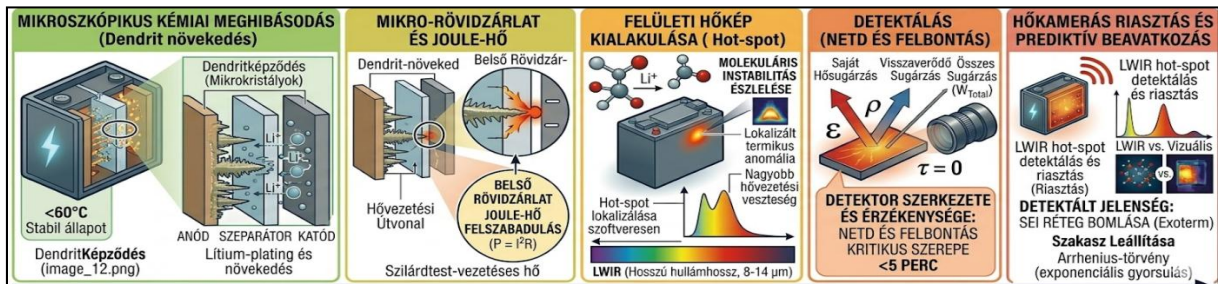
A hőkamerával folytatott megfigyelő rendszer prediktív képessége az, hogy a lítium-ion cellák belső, elektrokémiai minőségromlását, vagy a belső ellenállás növekedését már a korai szakaszban képes észlelni. A teljes folyamatot elindító legkritikusabb indikátor a dendritképződés, mely egy lassú, de összeadó folyamat a targonca akkumulátorok élettartama során. A folyamat lényege, hogy az egyes hatások, mint az öregedés vagy az öngerjesztés nem tűnnek el, hanem egymásra rakódnak és így együttesen egy egyre nagyobb eredő hatást hoznak létre. A lítium-ion akkumulátorok dendritképződése az egyik legnehezebben detektálható meghibásodási folyamat, mely a töltési ciklusok során, legfőképp a nem megfelelő körülmények (túl nagy áramerősség, túl alacsony környezeti hő) esetén következik be. Ilyenkor a lítium-ionok nem tudnak szabályosan beépülni az anód grafit rétegei közé, hanem fémes lítium formájában rakódnak le annak felületén. Ez a folyamat a lítium-plating, mely során nagyon kicsi – mikroszkopikus nagyságú, tűszerű kristálystruktúrák – azaz a dendritek kezdenek el növekedni az anódtól az elektroliton keresztül katód irányába.



8. ábra A lítium-plating jelensége és annak biztonságtechnikai kockázatai (Forrás: [4] alapján készítette a szerző)

Ezeknek a dendriteknek a növekedése jelent kritikus kockázatot, mivel ezek a tűszerű kristályképződmények képesek átszúrni az elválasztó réteget, ami mindösszesen tíz mikron vastagságú. Amint a dendrit így eléri a katódot, egy belső mikro-rövidzárlat keletkezik. Ebben a pillanatban alakul hőtermeléssé a korábban molekuláris szintű hibának vélt folyamat. A rövidzárlati ponton átfolyó áram hatására lokális felmelegedés kezdődik el. Bár ez a kezdeti fázis természetesen nem okoz még azonnali lánggal égést, a felszabaduló hőmérséklet értéke valahol 60 és 90 °C fok között lesz, ami már képes elindítani a szeparátor további lágyulását és ezáltal az elektrolit lassú bomlását. A hőkamerás rendszer feladata, hogy ezt a belső, pontszerű hőforrást képes legyen detektálni, mielőtt az termikus megfutássá fejlődik tovább. A hőkamera képén ekkor egy forró pontot láthatunk, mely az akkumulátor külső burkolatán jelentkezik.

A hőkép elemzése során ilyenkor nem egy szabályosan – egyenletesen melegedő képet látunk, hanem egy lokális, egy pontra koncentráló a környezettől markánsan elütő hőmérsékleti anomáliát, mely a targonca akkumulátorházának egy pontját jelöli. A hőkamerák már ezt a 0,5 – 1 °C-os változást is képesek detektálni és amikor a hőkamera szoftvere azonosítja a dendrit okozta anomáliát még a gázképződés előtt képes leállítani a teljes töltési folyamatát, megszakítva ezzel az oxidációs láncreakciót.



7. ábra A dendritképződés folyamatábrája (Forrás: [12] és [18] alapján készítette a szerző)

### 7.1 Hőmérséklet mérési algoritmus

A hőmérséklet-mérési algoritmus megköveteli, hogy a mérendő célpont legalább 5×5 pixelt foglaljon el a hőképen. Ez a minimális pixelméret feltétele annak, hogy a rendszer garantálni tudja a mérés pontosságát. De miért is fontos pont 5x5? - Ha a tárgy túl kicsi (például csak 1-2 pixelt fed le), a szélső pixelekbe "belemér" a hidegebb háttér is, ami rontja a mérés pontosságát. Az 5×5-ös szabály biztosítja, hogy a célpont közepén legyen legalább néhány olyan pixel, amit nem zavar a környezet hőmérséklete. A targonca töltőállomások monitorozásához jelenleg 3 féle különböző kialakítási lehetőség érhető – egy állású, több állású és integrált megoldás el melyek közül számunkra a több állású (multi – space) kialakítás lesz fontos: Egy 640 x 480 pixelből álló hőkamera 4-8 töltő helyét is képes egyszerre diagnosztizálni. Itt válik fontossá az FPGA alapú analitika, hiszen minden egyes töltőponthoz külön mérési zónát tudunk hozzárendelni. Képes egyszerre figyelni akár a polcrendszer (tűzvédelem) és a közlekedő folyosót (targonca szűrés) is.



8. ábra Multi space elektromos targonca töltőállomás megfigyelés (Forrás: [15] alapján készítette a szerző)

## 7.2 A mérés geometriai és logikai meghatározása

Fontos, hogy a hőkamerás rendszerek prediktív ereje nem csupán a képalkotásban és annak megjelenítésében, hanem a szabályalapú, matematikai adatokon nyugvó detektálásban - diagnosztizálásában rejlik. A töltőállomások monitorozása során a hőkamera szoftveres intelligenciája teszi lehetővé, hogy a mérést az adott fizikai környezethez és az elektrokémiai fázisokhoz igazítsuk. A diagnosztika során további 3 alapvető mérési mód kombinálható a maximális üzembiztonságot szem előtt tartva:

**Pontszerű mérés:** Ezt a szabályt a legkritikusabb elektromos csatlakozási pontokra (pl. targonca töltőcsatlakozója, DC kábelvégek) alkalmazzuk. Itt a cél nem más, mint a kontaktushibából származó lokális ellenállás-növekedés és az ebből fakadó Joule-hő azonnali észlelése, még mielőtt az átterjedne az akkumulátorcellákra.

**Területi mérés:** A teljes akkumulátor szekciót egy dinamikus mérési zónába foglaljuk bele, melynek eredményeképp a szoftver itt mindig a legmagasabb hőmérsékletű ( $T_{max}$ ) pixelt keresi. Ez biztosítja számunka azt, hogyha belső cellahiba – azaz dendritképződés alakul ki az akkumulátorház egy véletlenszerű pontján, akkor a rendszer képes legyen ezt is lokalizálni.

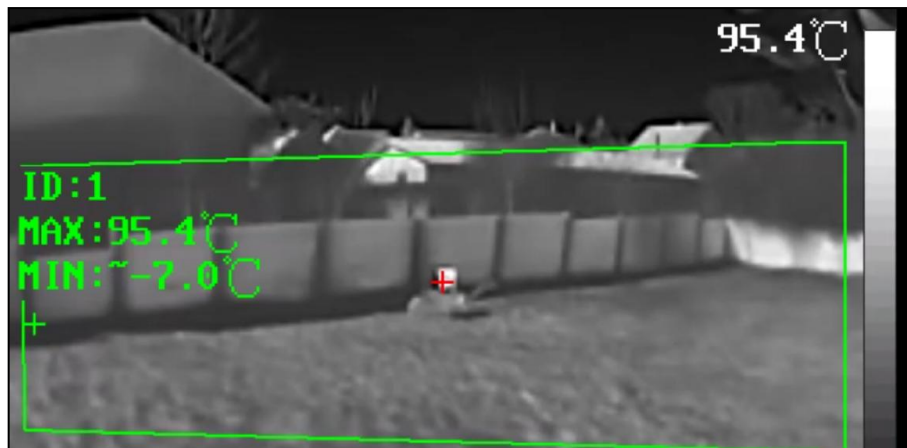
**Hőmérséklet különbség mérés ( $\Delta T$ ):** Lehetővé teszi a rendellenes hőfejlődés azonosítását a folyamatosan változó raktári környezetben is. Míg az abszolút hőmérséklet mérése egy fix értéket figyel, a  $\Delta T$  logika két vagy több mérési pont diagnosztikáján alapszik, illetve időpont közötti eltérést elemez, így küszöbölve ki a környezeti zavaró tényezőket.

## 8. RENDSZERINTEGRÁCIÓ, DIAGNOSZTIKAI KONFIGURÁCIÓ ESETTANULMÁNY

A hőkamerás diagnosztika hatékonyságának és prediktív képességének alátámasztása érdekében egy szabadtéri tesztkörnyezetet alakítottam ki. A teszt célja annak bizonyítása, hogy a hőkamerával ellátott biztonsági rendszer képes a termikus megfutás kritikus fázisait elkülöníteni és a beavatkozáshoz szükséges riasztási jeleket még a láncreakció kialakulása előtt továbbítani. A teszt során lítium akkumulátorral működő targonca hiányában a riasztóberendezésekben használatos lítium akkumulátorokat vettem alá termikus terhelésnek, miközben egy bispektrális optikával rendelkező hőkamerával folyamatosan monitorozásra került a folyamat. A kísérlet során a hőkamera szoftvere valamilyen háttérben lévő tárgy felületi hőmérsékletét  $-7,0$  °C-os minimum értékkel rögzítette. Ez nem az adott napi levegő hőmérsékleti értéke, hanem a környezet alacsony emissziójú felületeiről származó reflexiót reprezentálták. Az akkumulátort egy fehér  $28 \times 28$  cm széles és  $7$  cm vastagságú fémdoboz tartalmazta, melyen így egy  $0,85$  emissziós tényezőt lett alkalmazva. Ez a beállítás egy kritikus paraméter, különösen az esetünkben, hiszen a targoncában található akkumulátor is egy festett fémfelület mögött található. A festékréteg ugyanis jelentősen megnöveli a felület emissziós képességét. A tesztkörnyezet során a legpontosabb mérés elérése érdekében az úgynevezett fekete szigetelőszalag módszert alkalmaztam. Felragasztottam egy darab fekete szigetelőszalagot a doboz felületére – ezt azért tettem, mert a fekete PVC szalag szinte tökéletesen sugárzó és az emissziója fixen  $0,95 - 0,97$  érték. Egy pár perc várakozás után a szalag átveszi a doboz hőmérsékletét, beáll a termikus egyensúly. Ezután a hőkamerával rámértem a szalagra és beállítottam a  $0,95$  emissziós értéket, majd feljegyeztem a kapott hőmérsékleti értéket,  $35$  °C. Folytatásként rámértem a szalag melletti test felületére is, a kamera  $31,2$  °C-ot mutatott. A két mérési pont között  $3,8$  °C különbség volt, ami az emissziós értékből adódik. Ahhoz, hogy a festett felületen is valós  $35$  °C-ot lássunk a kamera szoftverében elkezdtem csökkenteni az emissziós tényezőt mindaddig, míg a két hőmérsékleti érték nem lesz azonos.

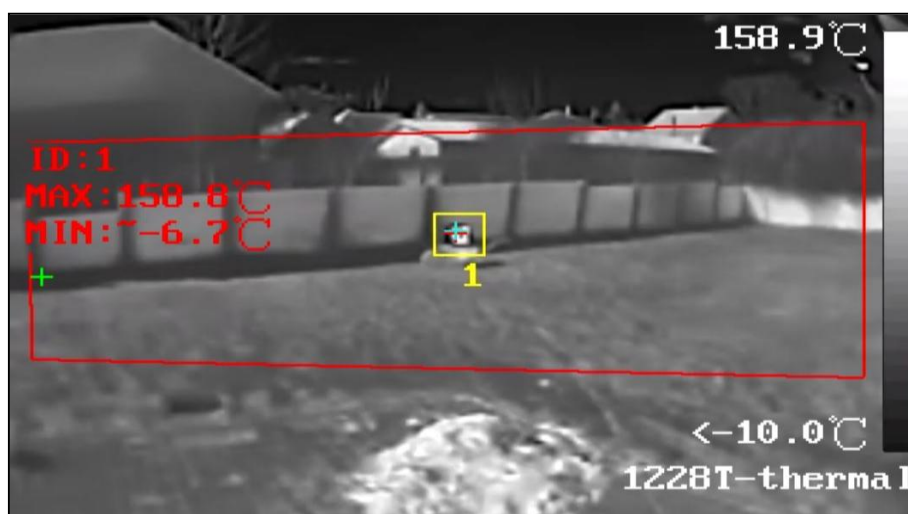
A pályázati anyagban szereplő képek alapján a kémiai eseménynaptárat figyelembe véve az alábbi fázisok azonosíthatók, mely során cél a kényszerített megfutást szimulálása volt:

1. Látens hőfejlődés detektálása, mely során a  $T_{\max}$  értéke a képeken is látható  $95,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot érte el. Ebben a szakaszban a hőkamerán látható zöld mérési zóna (ROI) már akkor képes volt jelezni a rendellenes hőmérsékletet, amikor vizuálisan mi még semmilyen elváltozást – sem füstöt, sem pedig lángot nem láthattunk. Kémiai háttér: Ezt a tartományt meg tudjuk feleltetni a SEI védőréteg exoterm bomlásának. Diagnosztikai érték: Ezt nevezhetjük a tűz előtti állapotnak, ahol a rendszer egy automatizált beavatkozással (például a töltőáram megszakítással) még képes lenne megállítani a folyamatot.



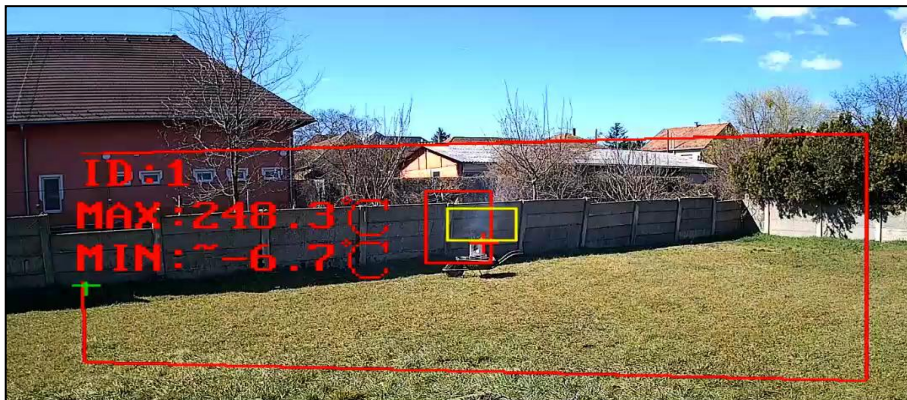
9. ábra Látens hőfejlődés detektálása (Készítette: a szerző)

2. Gázképződés és venting, mely során a  $T_{\max}$  értéke  $158,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot ért el, hiszen a hőmérséklet emelkedésével a görbe meredeksége ( $dT / dt$ ) exponenciálisan felgyorsult. Jelenség: A  $158,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérséklet értékénél a belső nyomás kinyitotta a biztonsági szelepet és megkezdődött a gázkifúvás. Hőkamerás prioritás: Bár vizuálisan már azt tapasztalhatjuk a képen, hogy megjelent a fehér elektrolit – aeroszol, azaz füstfelhő, a hőkamera LWIR sugárzása akadálytalanul hatol át a füstretegen és pontosan képes lokalizálni a fehér fémdobozon belüli forró pontot.



10. ábra A gázképződés és venting szakasza (Készítette: a szerző)

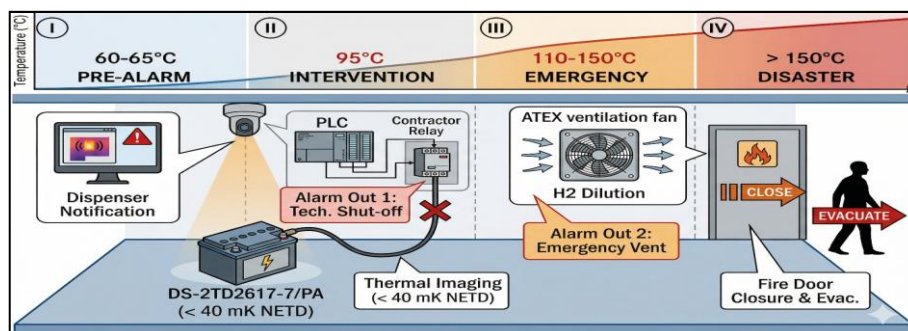
3. A termikus megfutás és katasztrófa részben a  $T_{max}$  értéke már eléri a 248,3 °C-os értéket, melyet a kísérlet végén rögzítettem le. Ennek az értéknek az eredményeképp a katód kristályrácsok összeomlanak és ezzel együtt belső oxigénfelszabadulás jelentkezik. A kísérlet során itt érkeztünk el a termikus megfutás kritikus és visszafordíthatatlan állapotához. A mérési adatok, valamint a vizuális dokumentáció alapján a hőkamerás rendszer által biztosított időablak egy hagyományos füstérzékelőhöz képest több perces előnyt jelent. Ez az időablak ipari környezetben nem csupán statisztikai adatként értelmezhető, hanem sokkal inkább az üzletmenet-folytonosság zálogaként tekinthető, hiszen míg a hagyományos füstérzékelők, csak a második, vagy a harmadik fázisban riasztottak volna, addig a hőkamera segítségével már a látens szakaszban képes volt detektálni a SEI réteg bomlását.



11.ábra Thermal Runaway (Készítette: a szerző)

#### A mérési pontok kritikai elemzése:

- 95,4 °C Látens szakasz - ez az érték már bőven az üzemi tartomány – targoncák esetében 60 °C felett van. Ez a SEI réteg bomlásának fázisát jelenti. Itt az akkumulátor már "fő", de még nincs nyílt láng. Ez bizonyítja a hőkamera prediktív erejét: akkor látja a bajt, amikor a doboz még egyben van.
- 158,9 °C Venting szakasz: Ez a pont a szeparátor megolvadásának 130 °C és 150 °C közötti értékét jelzi és a biztonsági szelep nyitásának felel meg. A képeken látható "fehéredő" hőkép az intenzív Joule-hő és a kiáramló forró gázok együttes jeleként jelentkezik.
- 248,3 °C az elkerülhetetlen katasztrófa, hiszen ez nem mérési hiba, hanem a teljes megfutás. Ekkor a doboz belsejében már tűz van. A hőkamera itt már nem megelőz, hanem az oltást segíti a lángon keresztüli látással.



12. ábra Beavatkozási mátrix (Készítette: a szerző)

A mátrix kialakításánál elsődleges szempont volt, hogy a reakcióidő minimalizálását biztosítsuk. Míg a hagyományos tűzjelző berendezések csak a III. vagy IV. fázisban (füst vagy nyílt láng esetén) lépnek működésbe, a hőkamerás rendszer már az I. és II. szinten megkezdheti a károk mérséklését. Az automatizált beavatkozás legfőbb előnye tehát, hogy a hőkamera az algoritmusával közvetlenül, emberi mulasztás lehetőségét kizárva kezeli az adott pillanatban felmerülő vészhelyzetet. Ez a prediktív szemléletmód biztosítja, hogy a töltés alatt álló targonca akkumulátorának hibája ne terjedhessen tovább a teljes logisztikai csarnokot veszélyeztető tűzesetté és okozhasson anyagi károkat, vagy ami sokkal rosszabb, személyi sérülést.

## 9. GAZDASÁGI VALIDÁCIÓ

A biztonságtechnikai rendszerek tervezése során a gazdasági fenntarthatóság is kulcsszerepet játszik. Teljes mértékben egyértelmű, hogy targonca-töltőállomások hőkamerás monitorozása kezdetben egy komolyabb pénzügyi beruházást – ráfordítást igényel, azonban a kockázatarányos megtérülés rendkívül kedvező. Egyetlen lítium-ion akkumulátor által okozott tűz képes egy teljes logisztikai részleg, a komplett tárolt árukészlet és a drága targoncaflotta megsemmisítésére. A targonca-töltőállomások hőkamerás megfigyelését egy speciális beruházási kategóriába tudjuk sorolni, ahol a haszon nem közvetlen pénzügyi bevételként jelentkezik, hanem sokkal inkább a potenciális veszteség elkerüléseként azonosítjuk. A döntéshozatali folyamat során a beruházási költségeket tehát (CAPEX) szembe kell állítani a kockázati kitettséggel.

- **Eszközállomány elvesztése:** Egy modern elektromos targonca típustól függően 15–35 millió forintos értéket jelent, melyből az akkumulátorcsomag 30-40%-ot tesz ki.
- **Infrastrukturális károk:** Az elektrolit pirolízise során korom és mérgező gázok keletkeznek (pl. hidrogén-fluorid), mely a teljes raktári acélszerkezetet és a gépészeti rendszereket is megkárosítják. Ezek gyakran bontási kötelezettséget vonnak maguk után, mely szintén pénzügyi költségként jelentkezik.
- **Készletvesztés:** A logisztikai csarnokokban tárolt áru értéke elérheti akár a több milliárd forintos értéket is, amely egy reaktív oltási folyamat (pl. sprinkler) során a füst- és vízkár miatt akkor is megsemmisül, ha a lángok nem érik el közvetlenül.
- **Leállási költség:** A raktár árukészletének kiesése a beszállítói lánc megakadását, vagy rosszabbik esetben a teljes megállását jelentheti. A napi kieső forgalom és a kötbérek mértéke naponta több tízmillió forintos tételt jelenthet.
- **Jogi és reputációs költségek:** Egy hosszas, elhúzódó hatósági vizsgálat és a piaci bizalomvesztés hosszú távú versenyhátrányt okoz a vállalatnak.

**ROI számítás alapja:** Amennyiben a hőkamerás megfigyelő rendszer a működési élettartama alatt (ami átlagos 5-8 év) akár csak egyetlen termikus megfutást is meggátol a látens szakaszban, úgy a beruházási költsége nemcsak megtérül, hanem az elkerült kár mértéke a rendszer bekerülési költségének többszörösét teszi ki.

Tétel megnevezése	Mennyiség	Egységár (nettó HUF)	Összesen (nettó HUF)
DS-2TD1228T-2/QA Bispektrális hőkamera	3 db	450 000	1 350 000
Hőkamera licenz	1 db	250 000	250 000
I/O modul / PLC (A beavatkozáshoz)	1 db	120 000	120 000
Hálózati infrastruktúra (PoE Switch + kiegészítők)	1 szett	180 000	180 000
Speciális strukturált kábelezés (FTP Cat6 + védőcsövezés)	1 projekt	150 000	150 000
Telepítés, konfiguráció és kalibráció	1 projekt	400 000	400 000
<b>ÖSSZESEN:</b>			<b>2 450 000 HUF</b>

1. ábra - A hőkamerás tűzvédelmi monitorozó rendszer beruházási költségterve (Készítette: a szerző)

## 10. TOVÁBBFEJLESZTÉSI JAVASLAT

A pályázati munka megírása során bemutatott külső, radiometrikus mérési rendszer továbbfejlesztésére azt gondolom több nagyszerű technológiai eszköz áll rendelkezésünkre, melynek implementációján érdemes elgondolkodni. Ez egyik ilyen továbbfejlesztési javaslatom az lenne, amikor a hőkamera által biztosított adatokat összevetjük az akkumulátor belső felügyeleti rendszerével, melyet BMS<sup>6</sup> rendszernek nevezünk. Leegyszerűsítve a rendszer feladata, hogy megóvja a cellák épségét, optimalizálja a teljesítményt és ennek eredményeképp megelőzze a tüzet. A jelenlegi rendszer ugyanis a burkolati hőmérsékletet figyeli, amely egy szilárd test vezetési képességének az eredménye. Amennyiben például a hőkamera külsőleg 80 °C-ot detektál, de a BMS belsőleg csupán 40 °C-ot mutat, a rendszer azonnal azonosítani tudja, hogy a hibaforrás nem a cellák belsejében jelentkezett, hanem a csatlakozási portoknál, amely kontaktushibára, vagy megnövekedett átmeneti ellenállásra utaló jel. A BMS adatai alapján továbbá szoftveresen kiszűrhetőek lennének a külső környezeti hatások, például a targonca burkolatát sütő napfény, vagy esetlegesen a közeli hőszugárzók okozta reflexiók, melyek jelenleg a rendszerszintű programozás során még konfigurációs kihívást jelentenek. A BMS három fő szinten lenne képes beavatkozni az akkumulátor működésébe és életébe. A rendszer folyamatos mérésekkel tudna szolgálni a vezérlő szoftver irányába, mely értékekkel megállapítható lenne az akkumulátor adott feszültsége, a rajta átfolyó áramerősség és a korábban már említett hőmérséklet. Ha bármelyik érték kilépne a biztonsági tartományból például egy túltöltés következtében, akkor a BMS képes lenne lekapcsolni a rendszert, hogy elkerülje a termikus megfutást. Fontos, hogy az akkumulátorcsomagok sok apró cellából állnak össze, melyek az idővel eltérő módon öregednek. A BMS képes gondoskodni arról, hogy ezt a különbséget kiegyenlítse, így minden cellát azonos töltöttségi szinten kezelne. Passzív balaszonlás esetben a BMS rendszer a cellák felesleges energiáját hővé alakítja, elpazarolja, míg aktív esetén átcsoportosítja a merültebb részekre. A BMS segítségével lehetőségünk van a legfontosabb mutatók meghatározására is. Az SoC – azaz a State of Charge megmutatja a pillanatnyi töltés értékét százalékos formában, míg a SoH – State of Health, az egészségügyi állapotot monitorozza az akkumulátor új korához képest.

<sup>6</sup> BMS – Battery Management System



2. ábra A BMS belső felépítése és funkciói (Forrás: [10] alapján készítette a szerző)

A két rendszert azonban érdemes egy rendszerként kezelni és egy biztonsági fúziót létrehozni, mely azt gondolom jelenleg még kihasználatlan terület a biztonságtechnika ezen területén. Ez annak köszönhető, hogy a BSM belső szenzorokkal, úgynevezett termisztorokkal dolgozik, addig a hőkamera a külső – vizuális adatot biztosítja. Ez az együttműködés biztosítja a megfelelő szintű biztonságot és diagnosztikát. A korai tűzmelegedést vizsgálva a BMS csak ott képes hőmérsékletet érzékelni, ahol maga a szenzor van. Azonban, ha egy csatlakozó lazult meg, vagy egy kábel kezd el izzani két szenzor között, akkor erről a BMS csak később értesül. Megoldásként a hőkamera szoftvere mér képes felismerni a kialakuló forrópontot, még azelőtt, hogy a cellák kémiai károsodnának. Ha a kamera kiugró hőértéket azonosít, jelet küld a BMS-nek, ami azonnal korlátozza az áramfelvételt. A kiterjesztett predikció és a belső ellenállás alapján a hőkamera és a BMS egy közös adatbázisa tenné azt lehetővé, hogy a töltési áramerősség és a felületi hőmérséklet emelkedés korrelációját folyamatosan elemezni tudjuk. Amennyiben egy akkumulátor azonos töltési karakterisztika mellett a korábbi ciklusokhoz képest akár gyorsabb, vagy akár magasabb hőmérsékletet mutat, az a belső ellenállás növekedésére és a dendritképződés előrehaladott állapotára utalhat. Ez a megközelítés lehetővé tudná tenni, hogy a karbantartási ciklusokat az adott akkumulátorok állapotához képest tervezzük meg, mellyel a cellák kritikus degradációját előzhetjük meg. A továbbfejlesztés következő lépcsőfoka a deep learning modellek alkalmazása a specifikus hőkép-mintázatok felismerésére lehetne. Minden akkumulátortípus és targoncátípus rendelkezik ugyanis egy sajátos termikus karakterisztikával a töltési folyamat során. A jövőbeli rendszerek azonban azt gondolom képesek lesznek megtanulni az adott flotta normálértékű hőmintázatát. A mesterséges intelligencia a prizmatikus vagy hengeres cellákra jellemző specifikus hőelvezetési mintákat lenne képes küldeni, mely riasztást váltani ki abban az esetben, ha a hő eloszlása nem felel meg a normál üzemnek, még abban az esetben is, ha az abszolút hőmérsékleti értékek a meghatározott határérték alatt maradnak. Egy utolsó lehetőségként szeretném megemlíteni a komplett rendszerintegrációt, mellyel a hőkamerás tűzvédelem képes lenne kilépni a szigetüzemű működésből és részévé válni a raktári irányítási rendszernek. Ennek köszönhetően az Alarm Out kimenettel nem csak a töltés lenne például leállítható, hanem közvetlenül utasítást is tudnánk küldeni a logisztikai szoftvernek. Egy valós scenario lehet, hogy amennyiben a hőkamera az intervention zónában, ami 95 fok körüli értéket jelent hibát detektál, a rendszer utasítást küldhet egy automata targoncának, vagy az a diszpécsernek az érintett eszköz azonnali kivontatására egy kijelölt, biztonságos zónába.

Az erőforrás optimalizálásnál is fontos rész lehet a WMS<sup>7</sup>, hiszen amennyiben egy töltőpontál rendszere a melegedés, a WMS automatikusa képes átütemezni a töltési feladatokat, akár más állomásokra is, elkerülve ezzel a hálózati túlterhelést és a hőtorlódást.

## 11. KÖVETKEZTETÉS

Pályázati munkám során a logisztikai raktárakhoz kapcsolódó egyik azt gondolom legkritikusabb kihívást – a töltés alatt álló targoncák lítium akkumulátorok megfűtésének korai detektálását vizsgáltam. A kutatás rávilágított arra a jelenleg fennálló kritikus biztonságtechnikai részre, amely a hagyományos, füst és hőérzékelésen alapuló rendszerek időbeli eltolódásából adódik. Ennek eredményeképp ezek a rendszerek reaktív jelzővel lettek ellátva, azaz csak akkor jeleznek, amikor már tényleg baj van, azaz megjelent a füst vagy a láng. A probléma lényege jelen esetben tehát az, hogy mire a hagyományos érzékelők jeleznek, addigra a folyamat már megállíthatatlan. Hőkamera segítségével képes vagyunk azonban ezt a fennálló rést áthidalni, hiszen az eszköz már akkor képes detektálni a melegedést, amikor még se füst, se láng nem jelentkezett. Véleményem szerint a hőkamerás megfigyelés és a technológia létjogosultságát az adja meg, hogy a segítségével képesek vagyunk már a látens szakaszban, azaz 60 – 110 °C között detektálni az akkumulátor beleséjben elinduló SEI védőréteg exoterm bomlását, miközben szabad szemmel még semmilyen füst, vagy láng nem észlelhető. A fizikai alapokat az hosszúhullámú infravörös – LWIR sugárzás biztosítja, amelynek a hullámhosszának segítségével a kamera képes a sűrű füstön keresztül is átlátni, így biztosítva azt a képességét, melynek segítségével a tűzfészek pontosan lokalizálható még akár a venting fázisban is. A gyakorlati esettanulmány folyamán igyekeztem maradéktalanul alátámasztani az elméleti feltételezéseimet. A kontroll alatt végrehajtott égési teszt folyamán a hőkamera már 95,4 °C-nál jelezte a kritikus melegedést, mely jóval a 158,9 °C-nál bekövetkező gázkifűvés (venting) és a 248,3 °C-on jelentkező termikus megfűtés előtti időpont. A kidolgozott beavatkozási mátrix segítségével és a különböző szoftveres algoritmusokra támaszkodva (AI trendanalízis, Delta T monitorozás) lehetővé tettük, hogy a humán mulasztást teljesen elhanyagolható tényezőként kezeljük, hiszen a komplett rendszer a hőkamera jele alapján képes a szelektív töltésleállításra és a vézszellőztetés elindítására is.

A gazdasági elemzés során igyekeztem rámutatni arra a tényezőre, hogy bár a rendszer egyszerű beruházási költsége egy magasabb pénzügyi elhatározást igényel, a 2 450 000 Ft-os érték mégis elenyésző amellet, amekkora káresemény következhet be egy termikus megfűtés során. A technológia tehát nem csupán, mint tűzvédelmi modernizáció, hanem racionális tőkevédelemként is felfogható, mely képes megóvni az akár több száz millió forint értékű infrastruktúrát és a raktárban tárolt árukészletet. A pályázati munkám zárásaképp megállapítható, hogy a hőkamerára támaszkodó diagnosztika nem csupán egy újabb eszköz a tűzvédelem palettáján, hanem egy olyan lehetséges paradigmaváltás, amely alapjaiban lesz képes átértékelni a biztonságtechnikai tervezés módszereit. A dolgozatom eredményei egyértelműen igazolják ugyanis, hogy a lítium-ion technológia által okozott speciális kockázatok kezelése többé nem bízható a hagyományos rendszerekre. A jövő raktározásának biztonsági záloga tehát a prediktív védekezés, mely a kémia bomlási folyamatok molekuláris szintű termográfiai felismerését jelenti, mely során nincs szükség emberi beavatkozásra, hiszen rendszer automatizált válaszreakciót küld. Ez a megközelítés véleményem szerint az egyetlen olyan járható út a logisztikai infrastruktúra és az üzletmenet – folytonosság megőrzéséhez, ahol a tűz elleni védekezés kialakítását már a füst és a lángok megjelenése előtti látens szakaszban kell megnyerni.

---

<sup>7</sup> WMS – Warehouse Management System, azaz a raktári irányítási rendszer

## 12. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Xie, J. – Lu, Y. C.: „A retrospective on lithium-ion batteries” *Nature Communications* 11 pp. 1-4. (2020)
- [2] Wang, Q.: „Thermal Runaway caused by internal short circuit in lithium-ion batteries” *Journal of Power Sources* 208 pp. 210–224. (2012)
- [3] D. Doughty: „A Lithium – Ion Battery Safety and Abuse Tolerance Review” *The Electrochemical Society Interface* 21 pp. 37–44. (2012)
- [4] M. Rosen – A. Farsi: *Battery technology* Academic Press (Elsevier) 2023.
- [5] B. Scrosati – K. M. Abraham – W. van Schalkwijk – J. Hassoun: *Lithium Batteries* John Wiley & Sons, Inc. 2013.
- [6] M. Vollmer – K.-P. Möllmann: *Infrared Thermal Imaging* Wiley-VCH 2017.
- [7] Hikvision Digital Technology: Thermal Camera Temperature Measurement White Paper szerző és kiadó nélkül 2024.
- [8] Battery University: Safety of Lithium-based Batteries [Online] Elérhetőség: <https://batteryuniversity.com/article/bu-304a-safety-of-lithium-based-batteries> (2026.03.03.)
- [9] 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról [Online] Elérhetőség: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1400054.bm> (2026.03.03.)
- [10] TvMI 12.1:2022.06.13. – Robbanás elleni védelem. Tűzvédelmi Műszaki Irányelvek [Online] Elérhetőség: <https://www.katasztrofavedelem.hu/application/uploads/documents/2022-04/78650.pdf> (2026.03.09.)
- [11] TvMI 7.2:2022.06.13. – Beépített tűzjelző berendezés tervezése, telepítése. Tűzvédelmi Műszaki Irányelvek [Online] Elérhetőség: <https://www.katasztrofavedelem.hu/application/uploads/documents/2023-12/82918.pdf> (2026.03.09.)
- [12] MSZ EN 60079-10-1:2016 – Robbanóképes közegek. 1. rész: Gázközegek osztályozása. Magyar Szabványügyi Testület
- [13] Balog F. – Dr. Beda L. – Kovács I. – Özvegy Gy.: *Tűzvédelmi mérnöki kézikönyv* Budapest: BME Mérnöktovábbképző Intézet, 2003.
- [14] J. Warner: *The handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design* Academic Press (Elsevier) 2024.
- [15] Hikvision Digital Technology: Thermal Imaging Core Technologies [Online] Elérhetőség: <https://www.hikvision.com/en/core-technologies/thermal-imaging/> (2026.03.19.)
- [16] Hikvision Digital Technology: Hik-Central User Guide [Online] Elérhetőség: [https://www.hikvision.com/content/dam/hikvision/pt-br/data-sheets/HikCentral-Professional-Control-Client\\_User-Manual\\_V2.2.0\\_20211120-2-2.pdf](https://www.hikvision.com/content/dam/hikvision/pt-br/data-sheets/HikCentral-Professional-Control-Client_User-Manual_V2.2.0_20211120-2-2.pdf) (2026.03.20.)

- [17] A lítium akkumulátorok típusai [Online] Elérhetőség:  
<https://www.batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion> (2026.03.25.)
- [18] Hikvision HeatPro technológiás hőkamerák [Online] Elérhetőség:  
[https://www.hikvision.com/content/dam/hikvision/eu/support/brochures/product-flyer/HeatPro-Series-Thermal-Cameras\\_EU\\_Apr.-2023.pdf](https://www.hikvision.com/content/dam/hikvision/eu/support/brochures/product-flyer/HeatPro-Series-Thermal-Cameras_EU_Apr.-2023.pdf) (2026.03.29.)
- [19] H. Kaplan: *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment* SPIE Press (The International Society for Optical Engineering) 2007.