

KERÉNYI BALÁZS ATTILA

AKUSZTIKUS OLTÁS: VAN ÚJ A NAP ALATT?

A jelenleg alkalmazott tűzoltási módszerek – a gázzal oltást leszámítva – mind másodlagos károkkal járnak, mivel a helyszínen oltóanyag marad vissza. A gázzal oltás pedig nyílt térben, bizonyos térfogat felett vagy aktív emberi jelenlét mellett nem alkalmazható. E problémára új szemléletű megoldást kínál a hangrezgések bevonása az aktív tűzvédelmi megoldások körébe.

Működési elv: a lángfront destabilizálása

Az akusztikus tűzoltás alapelve a hanghullámok gázközegre gyakorolt mechanikai hatásán nyugszik. A tűztetraéderből (oxigén, égéshez szükséges hőmérséklet, üzemanyag, kémiai láncreakció) a kémiai láncreakciót szünteti meg.

A folyamat során a lángfront viselkedése a hanghullámok frekvenciájának és amplitúdójának pontos megválasztásával manipulálható. Különböző üzemanyagok égésekor eltérő optimális oltási frekvenciatartományokról beszélhetünk; ezeken belül az adott tűztípusra leginkább ható frekvencia (melynek felderítése történhet frekvenciapáztázással vagy előre betáplált anyagjellemzőkkel) lesz az oltási frekvencia.

A folyamatos alkalmazás eredménye: a hanghullám akkora kinetikai energiát ad az égésterméknek és a reaktánsoknak, hogy azok sebessége nagyobb lesz a láng terjedési sebességétől. Emiatt a láng elszakad az égőfejtől – az infrahangok „kitépi” a lángot az éghető anyag felületéről.

A folyamat részletes mechanizmusa:

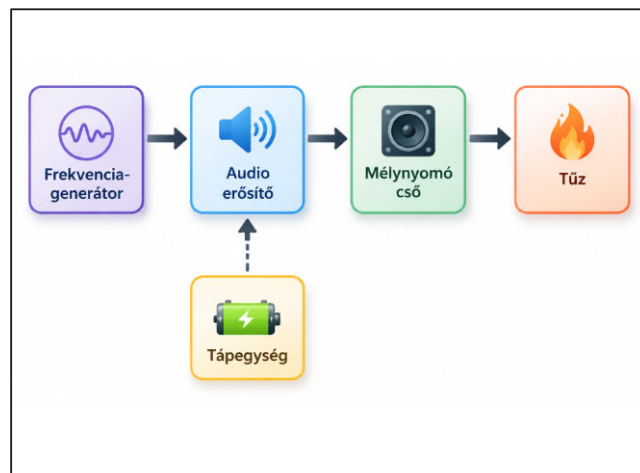
- a longitudinális rezgések periodikusan eltaszítják az oxigénmolekulákat az üzemanyag felületétől (az éghető gázba diffundáló oxigén utánpótlás megszakítása),
- ezzel destabilizálják a lángfrontot,
- a mechanikai behatás megszakítja a gyökös láncreakciót,
- a láng elszakad az utánpótlást biztosító üzemanyagtól,
- a gázok hőmérséklete a gyulladáspont alá süllyed – a tűz kialszik.

Hatékonyaságot befolyásoló tényezők

A hatékonyságot több tényező befolyásolja:

- Lángfront-geometria: kiterjedés, irány
- Lokális áramlási viszonyok: konvekció, turbulencia, külső szélhatás
- Üzemanyag kémiai minősége: éghető anyag típusa

Ezen tényezők ismeretében határozható meg az oltási frekvencia. Ennek folyamatos fenntartása mellett az amplitúdó növelésével fokozhatjuk a hangnyomást (magas és nagyon magas teljesítményű hanggenerátorok) addig, amíg az el nem éri a láng elfojtásához szükséges küszöbértéket.



I. ÁBRA: EGY AKUSZTIKUS OLTÓBERENDEZÉS
TIPIKUS FELÉPÍTÉSE

Fontos szempont az oltóeszköz(ök) térbeli elhelyezése is, mivel a hanghullámok visszaverődése (reflexiója) és interferenciája (negatív és pozitív is) módosítja a hatásfokot.

Több oltási mechanizmus kölcsönhatása

Mint az egyéb oltási módzatoknál, ennél a jelenségnél is több, egymással kölcsönhatásban működő oltási mechanizmus jelen van:

Mechanikai „elfújó” hatás (blow-off effektus)

Az akusztikus oltás során fellépő mechanikai lángelszakadás egy olyan fizikai folyamat, amelynek során az alacsony frekvenciájú hanghullámok által indukált, kényszerített konvekció (levegőáramlás) mechanikai úton jelentősen redukálja a határréteg vastagságát, vagy akár le is választja a lángfrontot az égő üzemanyag felületéről.

E jelenség elsődleges kiváltó oka: nem a közvetlen akusztikus hangnyomás, hanem a hanggenerátor membránjának oszcillációja által gerjesztett periodikus légáramlási sebességmező.

Hűtőhatás

A mechanikai „elfújó” hatás következtében a gerjesztett áramlás alacsonyabb hőmérsékletű közeget transzportál a lángfront közvetlen környezetébe. Ez az intenzív konvektív hőelvonás révén a gyulladási hőmérséklet alá csökkenti az éghető gázelegy külső rétegeinek lokális hőmérsékletét (lokális kioltást létrehozva), melynek következtében a láng bizonyos pontjain megszakad az égés.

Kutatások és alkalmazások

DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), USA – 2012

Kísérleteikkel igazolták, hogy az égő gázelegyhez közel helyezett hanggenerátor segítségével a frekvencia szerepe le-



2. ÁBRA: A SONIC FIRE TECH ERDŐTŰZ ELLENI MEGOLDÁSA (MÉG TESZTELÉSI FÁZISBAN)

csökken, és a hanghullámok által keltett lángra mért levegősebesség kerül előtérbe az oltás fizikáját tekintve. Akusztikai kollimátorok segítségével minimálisra tudták csökkenteni a hanghullámok diffrakcióját, ezáltal emelték a berendezés hatásfokát.

Sonic Fire Tech – 2024

A még tesztfázisban működő berendezések a 20 Hz alatti infrahangtartományban üzemelnek, ami kettős technológiai előnyt biztosít:

- Akusztikus környezetvédelem: az oltási folyamat az emberi hallásküszöb alatt marad, így akusztikailag nem szennyezi a környezetet
- Hatékony impulzusátvitel: a nagy hullámhosszú rezgések hatékonyabb impulzusátvitelt tesznek lehetővé

A hosszú hullámok kevesebb energiát veszítenek a levegőben, ezért nagyobb levegőtömeget képesek megmozgatni a lángfront destabilizálásához, mint a magasabb frekvenciák. A rendszer akár 7,6 méteres hatótávolságból is képes a tűz hatékony elfojtására.

Technikai megvalósítás:

- Dugattyús mechanizmus (hasonlóan egy autó motorjához)
- Fémcsöveken keresztül irányítja a rezgéseket a tűzfészekre (lásd: 2. ábra)
- Mindössze 500 watt energiával működik

Összefüggés DARPA és Sonic Fire Tech között

A Sonic Fire Tech fejlesztése során az alkalmazott frekvenciát az emberi hallásküszöb alá, az infrahangtartományba optimalizálták. Ez a megoldás lehetővé teszi a DARPA-jelentésben meghatározott kritikus akusztikus részecskesebesség elérését anélkül, hogy az oltási folyamat jelentős környezeti zajterheléssel járna.

Az alacsony frekvencia választása emellett:

- Kedvezőbb csillapítási tényezőt biztosít
- Nagyobb hatótávolságot enged meg

- Így a technológia valós lakókörnyezetben is hatékonyan alkalmazható a lángfront destabilizálására

Wilk-Jakubowski – 2026

Kutatása rámutat, hogy a torzított hullámformák, amelyek az alacsonyfrekvencia mellett magasabb rendű páros felharmonikusokat (kiegészítő rezgéseket) is tartalmaznak, fokozzák a lángfront mentén kialakuló turbulenciát. Ez a komplexebb akusztikai behatás elősegíti a láng destabilizációt és gyorsabb elszakadását az üzemanyagtól.

Hanghullámokkal oltás: előnyei és hátrányai

Előnyök

- Áthatoló képesség: a hanghullámokkal történő tűzoltás hatalmas előnye, hogy az égő anyag fizikai-kémiai jellemzőinek megfelelően modulált hullámok képesek áthatolni gázokon, folyadékokon és még szilárd testeken is.
- Biztonság: az emberi szervezetre gyakorolt hatásai (megfelelő beállítás függvényében) veszélytelennek bizonyulnak.
- Korai észlelés és oltás: alkalmazása nem jár sem élettani kockázattal, sem másodlagos anyagi károkkal, ezért a legérzékenyebb jelzőkkel párosítva szinte azonnali oltást válthatunk ki.
- Korlátlan oltási időintervallum: beépített oltóberendezésnél hálózati betáplálás (korlátlan) vagy akkumulátor, generátor kapacitásától függő működési idővel rendelkezik.
- Sokrétű alkalmazhatóság: konyhák, szervertermek, elektromos helyiségek, erdőtüz elleni védelem, kézi oltók, drónok.
- Szénhidrogéntüzek oltása: üzemanyaggyőzők szétosztása, oxigén elszakítása a lángtól. Kísérletek bizonyítják, hogy az akusztikus technológia alkalmazása kifejezetten hatásos a B (folyadék) és C (gáz) osztályú tüzek oltásában.

Hátrányok és korlátok

- Szűrőlágtüzek: minél stabilabb és gyorsabb a kifelé áramló égő üzemanyag, annál nagyobb akusztikus sebesség (vagyis hangnyomás) kell az oltáshoz.
- Öngyulladásra képes anyagok: lítiumion-akkumulátorok tüzeinél sem lehet a kívánt eredményt elérni, hiszen nem szünteti meg az égést belülről tápláló oxigén és a láng kapcsolatát.
- Visszagyulladás veszélye: bár átmeneti nyugalmi állapot érhető el, oltóanyag (hűtőközeg) hiányában a visszagyulladás veszélye fennállhat, amennyiben az üzemanyag hőmérséklete a gyulladáspont felett marad és leállítjuk az oltási folyamatot.

- Parázslás: a parázslással szemben hatástalan, mivel az nem a gázfázisú lángégés, hanem az anyag felületén végbemenő heterogén oxidáció. A parázslásra alkalmazott akusztikus behatás meggyorsíthatja annak végbemene-
telét, tehát ellentétes hatást válthat ki.
- Robbanás/közvetett tűz: robbanás, illetve közvetlenül az eszközre gyakorolt tűz hatására károsodhat és oltási ké-
pességét is elveszítheti a rendszer.

Kiegészítő védelem

Egyelőre csak kiegészítő védelemként gondolkodunk benne, mert míg kevésbé fejlett tüzeknél hatásos lehet, egy nagy láng-fronttal rendelkező, fejlett, agresszív, gyors reakciójú tűz ese-
tében korlátozott a hatékonysága.

Jövőkép: kiegészítő technológiák

Kiegészítő technológiaként az alábbi oltási módok mellett ja-
vasolt a használata:

Akusztikusan fokozott vízköd képzés

Az alacsony frekvenciájú hanghullámok meggátolják a víz-
cseppek egyesülését, így egy finomabb és homogén eloszlású ae-
roszolt hoznak létre a tűztérben. Ez a hibridizáció a kutatások
szerint akár 10-20%-kal javítja a hűtési hatékonyságot a láng és
a cseppek közötti megnövelt hőátadási felület révén.

Inert gázok és hanghullámok kapcsolata

Az inert gázos oltás hatásfokának növelésére alkalmazhatjuk
a hanghullámokat, az általuk gerjesztett gázok közötti moleku-
lális keveredéssel érhetjük el a kívánt eredményt. A láng körüli
termikus határréteg elvékonyításával az inert gázok (nitrogén,
argon stb.) molekulái gyorsabban jutnak el az égési zónába, így
megszüntette a gázkoncentráció helyi egyenetlenségeit, amely
kulcsszerepet játszik a visszagyulladás megakadályozásában.

Fejlesztési irányok

Korai észlelés

A tüzek minél korábbi észlelése elősegíti a folyamat haté-
konyságát, ezért az akusztikus oltás képességének fokozása ér-
dekében a leggyorsabb tűzérzékelési eszközök használata java-
solt. Pontatlanságuk, téves jelzéseik által elindított oltási
folyamat elfogadhatónak bizonyul, hiszen az akusztikus oltó-
rendszer működése kár okozása nélkül történik, így a tűz fejlett-
ségének korai szakaszában közbe lehet avatkozni és megakadá-
lyozni a továbbterjedést, tűzfelződést.

Irányíthatóság pontosítása

A jövőbeli fejlesztések pontosíthatják az akusztikus oltóbe-
rendezések irányíthatóságát. A detektálást követően az érzé-



3. ÁBRA: LÁTVÁNYTERV AZ ERDŐTÜZEK DRÓNOKKAL
TÖRTÉNŐ MEGFÉKEZÉSÉRE

kelők felől érkező adatok kiértékelése után irányíthatjuk az au-
tomatikus oltóberendezésünket a tűzfészek irányába, így na-
gyobb területet fedhetünk le (sprinklereknél: növelt szóráskép)
egyetlen oltóeszköz használatával. (Kollimátorok használatával
a lefedett terület tovább növelhető.)

Drónos alkalmazás

A drónos alkalmazás még kutatási fázisban van. Elsősorban
a vízhiányos és a nehezen megközelíthető helyek esetében tör-
ténő alkalmazása játszik kulcsszerepet.

Elvárások a drónhoz:

- elbír egy hordozható (vagy kifejezetten erre a célra kifej-
lesztett) akusztikus oltóeszközt,
- tűzálló,
- tudjon tájékozódni zero látótávolságú zónákban,
- méretei biztosítsák a tereptárgyakon és akadályokon való
átjutást,
- rotorjai (amennyiben vannak) védettek legyenek a külső
behatásokkal szemben.

Léteznek szárazföldi pilóta nélküli járművek is, melyek
szintén kísérleti fázisban, de kerekeken gurulva képesek elérni a
tűzfészeket és megkezdeni az oltást.

További lehetőségek

- Akár több drón együttes, szinkronizált alkalmazásával is
fokozható a kívánt hatás
- Erdőtüzeknél kifejezetten hatásos megoldást nyújthat
egy drónokból felállított tűzterjedést meggátló „akusz-
tikus védőfal” felállítása (lásd: 3. ábra), így közvetlen
emberi beavatkozás elkerülésével lehetne az erdőtüzek
kiterjedését mérsékelni
- Magas épületek helyiségeinek gyors beavatkozású oltása:
egy oltódrón felküldésével és a lakásba történő benavigá-
lásával több percet is nyerhetünk egy hagyományosan be-
avatkozó emelőkosaras szerrel szemben, mely idő kulcs-
fontosságú szerepet játszhat az emberi életék
mentésében és a lakások közötti tűzterjedésben

Környezeti előnyök: láthatatlan oltás, látható környezeti előny

Az akusztikus oltás, mint maradványmentes technológia kiváló környezetbarát és költséghatékony alternatívája lehet a hagyományos megoldásoknak.

- Erdőtűz – vegyi oltóvíz: retardáns vegyi anyagokkal kevert oltóvíz jelentős ökológiai kockázatot és mentesítési költséget jelent
- Épületek – oltóhab: fluorozott szénhidrogének (HFC) vagy az „örök vegyi anyagokat” (PFAS) tartalmazó oltóhabok jelentős ökológiai kockázatot és mentesítési költséget jelentenek
- Akusztikus rendszer: közvetlen környezeti terhelést nulla csökkenti

Fenntarthatóság a logisztikában

A gázzal oltók tartályainak költséges és szén-dioxid-igényes szállítása, valamint a sprinkler szivattyúk üzemanyag-igényes tesztelése helyett itt csupán az elektromos hálózat és az energiatárolók egyszerű felülvizsgálatára van szükség. Ezzel az ökológiai lábnyom, mint számottevő tényező az üzemeltetés során szinte teljesen megszűnik.

ESG-stratégia támogatás

A technológia alkalmazása túlmutat a pusztán tűzvédelmen: közvetlen támogatást nyújt a vállalatok ESG-stratégiájának megvalósításához:

- Környezeti (E): A vízlábnyom és a vegyi terhelés minimalizálása
- Társadalmi (S): Munkavállalók biztonságosabb védelme (korai észlelés, oxigénkiszorítás hiánya)
- Vállalatirányítás (G): Tűz utáni azonnali üzletmenet-folytonosság biztosításával (másodlagos kár hiánya) teremti valódi értékét.

Bár a technológia ma még az úttörők eszköze, a fenntarthatósági követelmények és a vízmentes megoldások iránti globális igény azt jelzi: az akusztikus oltás nem a távoli jövő, hanem a küszöbön álló változás, amely alapjaiban írja felül a tűzvédelemről alkotott eddigi ismereteinket.

Felhasznált irodalom

1. Selvaraj, J.; Karthikeyan, G.; Elangovan, H.K.; Dhanasekaran, N. Acoustic Fire Extinguisher. In Proceedings of the Advancement in Electronics & Communication Engineering 2022, 14 July 2022. Available online: <https://ssrn.com/abstract=4157577> (accessed on 28 May 2026).

2. Dong, Q.; Qi, J.; Lu, S.; Shi, L. Synergistic effects of typical clean gaseous fire-extinguishing agents. *Fire Saf. J.* 2024, 147, 104206. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104206>

3. Kuznetsov, G.; Kopylov, N.; Sushkina, E.; Zhdanova, A. Adaptation of Fire-Fighting Systems to Localization of Fires in the Pre-

mises: Review. *Energies* 2022, 15, 522. <https://doi.org/10.3390/en15020522>

4. Xiong, C.; Wang, Z.; Huang, X. Acoustic flame extinction by the sound wave or speaker-induced wind? *Fire Saf. J.* 2021, 126, 103479. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103479>

5. DARPA. Instant Flame Suppression: Phase II - Acoustic Suppression; FOIA Reading Room Report No. 13-F-1078; U.S. Department of Defense Washington Headquarters Services: Arlington, VA, USA, 2013. Available online: https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/FOID/Reading%20Room/Science_and_Technology/13-F-1078_REPORT_FLAME_SUPPRESSION_ACOUSTIC_SUPPRESSION.pdf (accessed on 28 May 2026).

6. Sonic Fire Tech. Sonic Fire Tech | NASA-Inspired Fire Defense. Available online: <https://www.sonicfiretech.com/> (accessed on 28 May 2026).

7. Bates Ramirez, V. How Sound Waves Can Fight Fires without Water. *Scientific American*, 8 December 2025. Available online: <https://www.scientificamerican.com/article/infrasound-tech-silences-wildfires-before-they-spread/> (accessed on 28 May 2026).

8. De Chant, T. Inaudible sound might be the next frontier in wildfire defense. *TechCrunch*, 14 October 2025. Available online: <https://techcrunch.com/2025/10/14/inaudible-sound-might-be-the-next-frontier-in-wildfire-defense/> (accessed on 28 May 2026).

9. Wilk-Jakubowski, J.L. Experimental Study of Flame Extinguishing Using a Smart High-Power Acoustic Extinguisher: A Case of Distorted Waveforms. *Sensors* 2026, 26, 1204. <https://doi.org/10.3390/s26041204>

10. Shi, X.; Ren, X.; Yang, J.; Liu, M.; Shi, B.; Heris, S.Z.; Xu, B.; Li, Y.; Zhang, Y.; Zhang, Y.; et al. Near-Acoustic field flow dynamics and their effect on the combustion characteristics of diffusion flames. *Fuel* 2026, 421, 139055. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.139055>

11. Shi, X.; Tian, Z.; Lu, Y.; Ye, Q. Research Status and Progress of Acoustic Fire Extinguishing Technology. *Fire* 2025, 8, 129. <https://doi.org/10.3390/fire8040129>

12. Wang, Z.; Wang, Y.; Liao, M.; Sun, Y.; Wang, S.; Sun, X.; Shi, X.; Kang, Y.; Tian, M.; Bao, T.; et al. FireSonic: Design and Implementation of an Ultrasound Sensing-Based Fire Type Identification System. *Sensors* 2024, 24, 4360. <https://doi.org/10.3390/s24134360>

13. Wilk-Jakubowski, J.; Loboichenko, V.; Divizinyuk, M.; Wilk-Jakubowski, G.; Shevchenko, R.; Ivanov, S.; Strelets, V. Acoustic Waves and Their Application in Modern Fire Detection Using Artificial Vision Systems: A Review. *Sensors* 2025, 25, 935. <https://doi.org/10.3390/s25030935>

14. Soman, D.; George, V.; Sai, R.N.; Gupta, A.; Agarwal, A.; Kini, S. Acoustic fire extinguishing module for an unmanned vehicle. *Cogent Eng.* 2025, 12, 2602277. <https://doi.org/10.1080/23311916.2025.2602277>

15. Yilmaz-Atay, H.; Wilk-Jakubowski, J.L. A Review of Environmentally Friendly Approaches in Fire Extinguishing: From Chemical Sciences to Innovations in Electrical Engineering. *Polymers* 2022, 14, 1224. <https://doi.org/10.3390/polym14061224>

Kerényi Balázs Attila hallgató

Óbudai Egyetem, Bt. BSc. Tűzvédelmi specializáció